E. O.

T I et T II

---

Photographie

T II pp 167 à 234

# LA LUMIÈRE

## SES CAUSES ET SES EFFETS

---

TOME I

TYPOGRAPHIE DE H. FIRMIN DIDOT. — MESNIL (EURE).

# LA LUMIÈRE

## SES CAUSES ET SES EFFETS

PAR

**M. EDMOND BECQUEREL**

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DE L'INSTITUT DE FRANCE

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS, ETC., ETC.

---

TOME PREMIER

**SOURCES DE LUMIÈRE**

PARIS

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES, FILS ET Cie

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56

1867

# AVANT-PROPOS.

Cet ouvrage n'est pas un traité d'optique, car on n'y expose aucun des principes généraux relatifs à la propagation de la lumière ainsi qu'aux lois de la réflexion, de la réfraction, de la diffraction, de la polarisation, etc... ; il ne comprend que quelques-unes des questions qui font ordinairement partie des traités de physique et il renferme spécialement, comme son titre l'indique, l'exposé des principaux faits concernant la production de la lumière ainsi que l'influence que les rayons lumineux exercent sur les corps.

Cet ouvrage, en outre, est purement expérimental, et le petit nombre de considérations théoriques qu'on y trouve ont été jugées nécessaires pour réunir et expliquer les faits. L'on a admis que le mouvement vibratoire de la matière est cause des phénomènes lumineux et que la transmission de la lumière a lieu, à distance, par l'intermédiaire d'un milieu éthéré qui pénètre tous les corps; l'on a donc admis l'hypothèse des ondulations, cette hypothèse facilitant les explications que l'on peut donner et rendant compte de tous les effets qui ont été observés jusqu'ici.

Il est divisé en deux parties formant chacune un volume.

La première partie traite des sources lumineuses et comprend plusieurs livres : après les préliminaires où se trouvent exposées quelques considérations générales sur les sources célestes ou météoriques, le I^er livre donne l'historique des travaux qui ont été faits sur la phosphorescence, principalement de-

puis le commencement du quinzième siècle jusqu'au milieu de celui-ci, époque à laquelle ces phénomènes ont reçu de grands développements.

Le IIe livre est relatif aux effets lumineux qui sont produits par les actions moléculaires, c'est-à-dire les effets de phosphorescence par frottement, par clivage et par cristallisation.

Le IIIe livre renferme l'étude des sources lumineuses par élévation de température, et il comprend non-seulement les effets de phosphorescence par l'action de la chaleur, mais encore les phénomènes d'incandescence, c'est-à-dire qu'il est relatif à la plupart des sources lumineuses qui sont utilisées actuellement dans l'industrie. Il contient les rapports des pouvoirs éclairants de ces différentes sources ainsi que les procédés pyrométriques capables d'indiquer leur température.

On expose dans le IVe livre les principes généraux de l'analyse de la lumière par réfraction et les résultats des recherches sur les raies brillantes ou obscures des spectres lumineux; on indique comment ces raies brillantes permettent de reconnaître la nature des substances volatilisées dans les flammes, et quelle est l'application de l'analyse spectrale à l'étude des sources lumineuses d'origine météorique ou céleste.

Le Ve livre est consacré aux effets lumineux produits par l'électricité, ainsi qu'aux météores lumineux que l'on rapporte à l'influence de cet agent.

Dans le VIe livre se trouvent exposés les effets de phosphorescence par l'action de la lumière; ce livre est le plus étendu de ce volume, et renferme le résumé des différents mémoires que j'ai publiés sur ce sujet. Il contient l'indication des méthodes de préparation des matières qui ont été nommées phosphores artificiels, ainsi que les résultats des observations faites avec le phosphoroscope, lesquelles prouvent qu'un grand nombre de corps émettent de la lumière en vertu

d'une action qui leur est propre, et cela par une persistance d'effet due à l'influence du rayonnement lumineux.

Les phénomènes lumineux observés dans le phosphoroscope permettent d'aborder des questions analogues à celles qui règlent le refroidissement et les quantités de chaleur émises ou absorbées par les corps; ils peuvent être invoqués dans l'étude de plusieurs questions de physique moléculaire, et servent à éclairer différents points d'analyse chimique; ils forment donc en quelque sorte une nouvelle branche de l'optique, et en raison de leur importance ils ont été exposés avec de grands détails.

Le VII^e livre est relatif aux effets de phosphorescence dans les corps organisés, c'est-à-dire à la phosphorescence des végétaux et des animaux.

La deuxième partie de l'ouvrage, ou le second volume, comprend les effets produits par la lumière, c'est-à-dire les actions calorifiques, chimiques et physiologiques auxquelles cet agent peut donner lieu. Les résultats relatifs aux effets chimiques surtout recevront de grands développements, jugés nécessaires pour l'exposé des différentes méthodes photographiques. On fera connaître également les principales recherches relatives à l'influence de la lumière sur la végétation.

On voit que cet ouvrage contient une grande partie de mes recherches sur la lumière depuis bientôt trente années; leur réunion permettra de reconnaître qu'elles ont toutes été dirigées vers un même but, celui d'étudier des questions de physique moléculaire qui ont trait à la transmission de la lumière aux particules des corps, c'est-à-dire des questions qui se rapportent à une des parties les plus importantes et les plus délicates de la physique.

---

# Ire PARTIE.

## SOURCES DE LUMIÈRE.

## PRÉLIMINAIRES.

### SOURCES LUMINEUSES DIVERSES.

On distingue parmi les sources lumineuses celles qui ont une origine météorique de celles qui proviennent d'actions mécaniques, physiques ou chimiques; elles sont dues à la même cause, au mouvement vibratoire des particules de matière : les moyens de produire ces vibrations, qui doivent acquérir une certaine vitesse pour donner lieu au phénomène de la lumière, sont seuls différents.

Les sources lumineuses d'origine météorique qui se présentent à nous sont les astres, comme le soleil, les étoiles, les comètes, les nébuleuses, ainsi que les météores tels que la lumière zodiacale, les bolides, les aurores polaires et les effets électriques produits dans les orages. Celle qui pour nous est la plus puissante est le soleil, lequel, placé au centre de notre système planétaire, lance de toutes parts des rayons qui vivifient tous les corps placés sur la terre. Ces rayons en effet transportent avec eux dans l'espace non-seulement le pouvoir d'éclairer et de rendre visibles d'autres corps, mais encore le pouvoir d'échauffer et de produire une foule de réactions chimiques sources de la vie, propriétés sans lesquelles le globe terrestre, réduit au rayonnement des autres astres, serait privé d'êtres vivants.

Les flammes les plus vives et les corps solides à l'état d'incandescence

ne semblent être que des taches noires quand on les interpose entre l'image du disque solaire et les yeux. La lumière de l'arc voltaïque se rapproche par son intensité de la lumière solaire, quoiqu'elle soit également plus faible que celle-ci, et on ne peut comparer la lumière émanée du soleil qu'à celle des vives étincelles produites dans les décharges électriques.

Plusieurs physiciens ont évalué l'intensité lumineuse du soleil par comparaison avec celle d'une source connue, celle d'une bougie par exemple; mais l'énorme différence d'intensité de ces sources et la difficulté de comparer des lumières de diverse composition sont cause de l'incertitude des déterminations. Ainsi Bouguer (1) a trouvé que l'éclat moyen du disque solaire, au zénith, à midi dans un ciel pur, était égal à 11664 fois la lumière d'une bougie placée à 16 pouces de distance, c'est-à-dire, d'après le rapport inverse du carré des distances, égal à 62280 fois la lumière d'une bougie placée à 1 mètre. Vollaston (2) a obtenu un nombre à peu près semblable, puisqu'il a évalué cette intensité à 5563 fois celle d'une chandelle placée à 30 cent.,48, c'est-à-dire à 59850 fois celle de la chandelle placée à 1 mètre. Arago (3) a indiqué le nombre de 15000 bougies comme représentant l'intensité lumineuse solaire (4).

(1) Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, p. 30; 1729.

(2) *Transact. phil.*, t. 89; 1799. — Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 89.

(3) Arago, *Astronomie*, t. 2, p. 171.

(4) Pour comparer les intensités lumineuses à surface lumineuse égale, il faut que l'on suppose la bougie placée à une distance telle qu'elle soustende un angle égal à celui sous lequel le soleil est vu, c'est-à-dire 30'; or l'image de la flamme est oblongue, et reçue sur un écran plan au moyen d'une lentille, elle offre une étendue qui peut être évaluée à 1,8 centimètre carré pour la partie lumineuse. En supposant cet espace circulaire, il faudrait placer ce cercle de 1,8 centimètre carré ou de 0,755 centimètre de rayon, à 1 mètre 73 pour que son diamètre sous-tendît un arc de 30 minutes. A cette distance, on aurait pour l'intensité lumineuse du soleil celle de la bougie ou de la chandelle, qui est à peu près la même, étant égale à l'unité :

D'après l'observation de Bouguer..... 186400,
D'après les déterminations de Vollaston..... 179130,

ou environ 180000. Cela veut dire que chaque partie de la surface du soleil, vue au travers de l'atmosphère et égale à la surface de la flamme d'une bougie, a un éclat 180000 fois plus fort que celui de la bougie.

Ce nombre est plus élevé que celui que j'ai obtenu en comparant directement, au moyen d'un photomètre qui sera décrit dans cet ouvrage, l'intensité de la lumière solaire avec celle de la partie la plus lumineuse de la flamme d'une bougie; j'ai trouvé environ 50000 pour le rapport des intensités. Mais la lumière solaire était réfléchie par un miroir, et il

On ne parle, bien entendu, que de l'éclat du soleil vu de la terre au travers de l'atmosphère. Bouguer, dans l'ouvrage cité plus haut, a trouvé que dans un ciel pur l'intensité de la lumière d'un astre placé au zénith diminuait d'un peu moins de $\frac{1}{5}$ de sa valeur, par suite de la présence de l'air (cette intensité était 0,8123, celle que l'on aurait sans la présence de l'atmosphère étant 1 ); près de l'horizon cette intensité lumineuse était réduite environ au $\frac{1}{6}$ de sa valeur. La présence de la vapeur d'eau et des nuages peut faire varier ces quantités dans de plus fortes proportions.

La comparaison des quantités de chaleur émises par le soleil peut être faite par des moyens plus précis que ceux qui servent à comparer les intensités des lumières différentes, et donnent une idée de la puissance de rayonnement de cet astre.

Il résulte des expériences de M. Pouillet (1) sur l'élévation de température d'un corps pendant un temps déterminé par l'action du soleil, lorsque cet astre est à différentes hauteurs au-dessus de l'horizon, que la quantité totale de chaleur que recevrait notre planète en un an de la part du soleil serait capable de fondre une couche de 29 mèt.,3 de glace répandue sur toute sa surface. Comme la présence de l'atmosphère s'oppose au moins à ce que moitié de cette chaleur n'arrive sur la couche solide du globe, la quantité de chaleur que reçoit la surface terrestre en un an de la part du soleil serait capable seulement de fondre une couche de glace de 15 mètres d'épaisseur qui serait répartie uniformément sur la terre.

Il est facile, d'après les mêmes données, d'estimer la quantité de chaleur qui serait émanée à chaque instant du soleil : elle est telle qu'elle fondrait en une minute une couche de glace environnant cet astre et ayant 11 mètr.,2 d'épaisseur, ou bien en un an une couche de glace de 16 kilomètres.

L'analyse des rayons lumineux par réfraction a révélé dans l'image

faut presque augmenter de moitié le nombre précédent pour qu'il se rapporte à la lumière directe; d'un autre côté, j'ai pris pour point de comparaison la partie la plus lumineuse de la flamme, et l'intensité moyenne de toute la surface est un peu moindre, ce qui tendrait à augmenter encore le nombre pour le rendre comparable à ceux qui ont été donnés par Bouguer et Vollaston. Du reste, l'intensité des rayons solaires est très-variable d'un jour à l'autre, en raison de la sérénité plus ou moins grande de l'atmosphère. ( Voir *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 62, page 34, 1861.)

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 7, p. 25. — Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité de physique terrestre et de météorologie*, p. 48. — *Annuaire. météorologique de la France pour* 1850.

du spectre solaire à Wollaston et à Fraünhofer des raies, ou stries noires, dont la position fixe ne dépend que des circonstances dans lesquelles la lumière elle-même se produit, ainsi que des milieux qu'elle traverse pour arriver jusqu'à nous. La coïncidence de quelques-unes de ces raies avec des raies brillantes que l'on observe dans les flammes provenant de la combustion de différents corps ont conduit à cette conjecture que les corps qui produisaient ces dernières se trouvaient peut-être dans l'atmosphère solaire. On sait combien ces recherches ont reçu de développements dans ces dernières années, et l'on verra ultérieurement tout le parti que les sciences physiques peuvent tirer de l'analyse optique par réfraction pour reconnaître l'existence de certains principes chimiques dans les milieux gazeux incandescents. L'astronomie surtout peut trouver un puissant secours dans l'étude des propriétés de la lumière à l'aide desquelles elle peut aborder des questions qui semblaient devoir échapper à nos moyens d'investigation.

Les effets de polarisation servent aussi à donner des indications précieuses sur les conditions physiques des corps considérés comme sources de lumière, car les rayons émis par ces sources ne provenant pas seulement de la surface extrême qui les limite, mais d'une certaine profondeur, doivent participer aux propriétés des rayons qui ont traversé, sous une inclinaison déterminée, une épaisseur plus ou moins grande de matière. C'est ainsi qu'Arago a reconnu (1) que la lumière qui émane sous un angle suffisamment petit de la surface d'un corps solide ou d'un liquide incandescent, lors même que cette surface n'est pas suffisamment polie, offre des traces évidentes de polarisation, en sorte qu'en pénétrant dans son polariscope elle se décompose en faisceaux colorés ; mais si la lumière émane d'un gaz enflammé, comme de la flamme du gaz d'éclairage, elle reste au contraire à l'état naturel. Il a été conduit ainsi à conclure que la lumière des bords du soleil n'étant pas polarisée, cet astre se comporte comme une masse gazeuze lumineuse.

Ces recherches, jointes à celles qui résultent des changements qui s'opèrent à la surface du soleil, viennent confirmer les opinions des astronomes quant à l'incandescence de l'atmosphère de cet astre qui rayonne vers nous, et que l'on a nommée photosphère. Mais cette incandescence d'origine éprouve-t-elle une diminution dans la suite des siècles ou bien est-elle maintenue par des mouvements moléculaires tels que

(1) Arago, *Astronomie*, t. 2, p. 102.

ceux qui résulteraient de la chute d'aérolithes gravitant autour du soleil, comme l'a supposé Mayer dans ces dernières années, ou par des courants électriques circulant autour de cet astre, comme l'avait supposé Ampère, ou provient-elle de changements inconnus dus au déplacement du système solaire? C'est une question qui n'est pas résolue aujourd'hui.

Il est possible, d'un autre côté, que le soleil soit un astre qui s'éteigne graduellement et que la diminution de son incandescence n'ait pas été sensible depuis les temps historiques. On ne peut faire que des conjectures à cet égard; on sait seulement que la lumière solaire se comporte comme si elle émanait d'un corps incandescent dont la température serait portée aux plus hautes limites que nous puissions atteindre. Nous verrons en effet dans cet ouvrage que les lumières artificielles qui ont une intensité suffisante peuvent donner lieu aux mêmes effets que la lumière solaire elle-même.

La lune et les planètes ne sont pas des astres lumineux par eux-mêmes, et ne font que réfléchir par diffusion la lumière qu'ils reçoivent du soleil; les différences que présentent les rayons qu'ils nous envoient ne sont donc que des différences d'intensité. C'est ce que vient confirmer l'analyse optique, qui donne la même composition pour la lumière de ces astres que pour la lumière solaire.

Bouguer (1) a évalué l'intensité de la lumière donnée par la lune par rapport à celle envoyée par le soleil, et a trouvé que dans les conditions les plus favorables elle ne dépassait pas $\frac{1}{300\,000}$ de celle du soleil. Robert Smith, par le calcul, en admettant que la surface de la lune ne réfléchisse que le quart de la lumière incidente, est arrivé à peu près à la même valeur; mais Wollaston a donné un nombre plus de deux fois moindre, $\frac{1}{800\,000}$.

La faible intensité du rayonnement lunaire fait comprendre pour quel motif les effets thermométriques donnés par les rayons de notre satellite sont à peine appréciables même lorsque ces rayons sont concentrés au foyer d'une lentille, bien que dans des conditions semblables les métaux les plus réfractaires puissent être fondus par l'action des rayons solaires. Si l'on suppose en effet que la température obtenue avec les rayons solaires concentrés soit de 1500° et même de 2000°, et que l'effet produit par les rayons lunaires ne conduise qu'à la trois-cent-millième partie de ce nombre, on n'arriverait qu'à une température de $\frac{1}{150}$ de de-

(1) Bouguer, ouvrage cité plus haut, p. 28. — Arago, *Astronomie*, t. 3, p. 462. — Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 92.

gré, qui serait à peine appréciable dans les conditions ordinaires. On verra dans le courant de cet ouvrage que les phénomènes de phosphorescence et les effets chimiques, plus sensibles que les effets calorifiques, peuvent être observés aussi bien avec la lumière de la lune qu'avec la lumière solaire, et sont en rapport avec l'intensité des rayons émanés de ces astres.

Les étoiles sont lumineuses par elles-mêmes, et sont des sources de lumière indépendantes du soleil. On sait qu'il y en a de différentes teintes : quelques-unes sont rougeâtres, d'autres ont une teinte bleuâtre. L'analyse prismatique donne du reste une composition particulière pour la lumière émise par chacune d'elles. Il est probable qu'elles doivent leur lumière à la même cause que celle qui produit la lumière solaire, et que les différences observées tiennent aux matières qui constituent ces soleils, ou du moins leurs atmosphères, ainsi qu'à leur degré d'incandescence ; on a même supposé que celles dont les couleurs étaient orangées et rouges avaient une incandescence moins vive que les autres et étaient par conséquent en voie de refroidissement.

Les étoiles à surface égale ont une intensité lumineuse qui ne le cède en rien à celle de la lumière solaire, et il est possible qu'il y en ait dont l'éclat soit supérieur à celui du soleil. Mais les distances immenses qui nous séparent de ces astres ne permettent de recevoir d'eux qu'une faible quantité de lumière. Wollaston, en comparant la quantité de lumière qui nous arrive de Sirius, une des étoiles les plus brillantes, avec celle qui émane du soleil, a estimé que celle-ci était environ 200000 millions de fois plus forte que celle que nous recevons de cette étoile.

Sirius, comme les étoiles les plus proches de nous, est encore à une telle distance qu'il faut prendre des unités intermédiaires pour s'en faire une idée : on sait que la vitesse de la lumière est environ 75000 lieues de 4 kilomètres par seconde ou environ 300000 kilomètres; d'après cette évaluation, la distance de ces astres est telle que leur lumière mettrait au moins trois ans à nous parvenir. Quant aux étoiles télescopiques, les astronomes pensent qu'il y en a dont la lumière, en raison de leur distance, mettrait au moins des milliers d'années pour arriver jusqu'à nous (1) ; on peut juger, d'après leur éloignement, de la faible quantité de lumière que nous recevons d'elles.

La lumière des nébuleuses, comme celles des autres sources stellaires, peut être soumise à l'analyse par réfraction, et les observations pourront

(1) Arago, *Astronomie*, t. 2, p. 18.

peut-être montrer si ces nébuleuses sont formées de matières gazeuses ou de parties solides ou liquides incandescentes. On voit par là que si le télescope indique les positions et les distances relatives des astres, le prisme permet de décomposer leur lumière et nous donne des indications précieuses sur leur constitution.

La lumière zodiacale est un phénomène remarquable, qui dans nos climats ne s'aperçoit après le coucher du soleil qu'en janvier, février, mars et avril, ou avant son lever en novembre; elle apparaît alors comme une sorte d'ellipse ou de fuseau lumineux s'étendant dans la direction de l'équateur solaire. Sa lumière est blanchâtre, et se présente comme une sorte de nébulosité environnant le soleil et qui dépasse même l'orbite terrestre. Dans les régions tropicales elle est beaucoup plus apparente, en raison de la sérénité de l'atmosphère. On peut avoir une idée de l'intensité de cette lumière en remarquant que placée au-devant d'étoiles plus faibles que la 5e grandeur elles les rend invisibles. La lumière zodiacale, observée pour la première fois par Childrey, vers 1659, a d'abord été étudiée par J.-D. Cassini, en 1683.

On a donné plusieurs explications de ce phénomène : la plus probable consiste à admettre qu'il est dû à un ensemble de corps qui forment autour du soleil comme une zone d'astéroïdes solides très-écartés, mais occupant une immense étendue, et au milieu de laquelle la terre se trouve plongée; les bolides et les étoiles filantes ne seraient alors que des parties isolées de cet ensemble de corps qui, attirées dans la sphère d'activité de la terre, tomberaient à sa surface. D'après cette hypothèse, la lueur de la lumière zodiacale serait due à la lumière solaire réfléchie, et l'absence de polarisation que l'on remarque proviendrait de ce que la lumière est refléchie dans tous les plans possibles sur les surfaces orientées diversement de cette multitude de corps.

On sait que Mayer a supposé que l'incandescence du soleil pouvait être maintenue pendant des milliers d'années, en admettant une chute continuelle de ces astéroïdes sur le soleil, laquelle produirait, par cet effet mécanique un développement d'une quantité de chaleur qui pourrait compenser la perte continuelle due au rayonnement dans les espaces célestes. D'après les calculs de Mayer, il suffirait qu'il tombât annuellement une masse de même densité que celle du soleil et augmentant son rayon de 6 mètres $\frac{1}{2}$ pour compenser la perte de chaleur qu'il éprouve.

La lumière des bolides, ainsi que celle des autres sources lumineuses météoriques d'une intensité suffisante peut être soumise aux mêmes modes d'investigation que la lumière des astres. Quant à celle des aurores polaires, elle a de tels rapports avec la lumière électrique que l'origine de ce météore ne paraît guère douteuse aujourd'hui. Mais, ainsi qu'on le verra plus tard, l'électricité ne pouvant donner de la lumière qu'en portant momentanément à l'incandescence les particules matérielles qui la transmettent, il en résulte que les sources lumineuses d'origine météorique doivent être considérées comme devant leurs propriétés à l'incandescence de la matière.

Il y a d'autres sources lumineuses que celles d'origine météorique, et qui sont dues à des actions physiques ou chimiques, telles que le frottement, la percussion et l'influence de la chaleur et de l'électricité; elles émettent des rayons qui sont soumis aux mêmes lois que les rayons provenant de la lumière solaire ou stellaire. Elles vont être étudiées en détail dans les différents livres de la première partie de cet ouvrage et comparées aux sources diverses dont il vient d'être question.

# LIVRE PREMIER.

## NOTICE HISTORIQUE DES RECHERCHES FAITES SUR LA PHOSPHORESCENCE JUSQU'EN 1840.

## CHAPITRE PREMIER.

### État des connaissances sur la phosphorescence jusqu'au commencement du dix-septième siècle.

§ 1. *Phosphorescence des corps organisés.*

On comprend habituellement sous le nom de phénomènes de phosphorescence des phénomènes différents quant à l'origine, mais en vertu desquels un grand nombre de corps ont la faculté de devenir des sources lumineuses. La lumière qui se produit alors, et qui est plus ou moins vive et diversement colorée, est analogue à celle que répand le phosphore dans l'air; elle apparaît spontanément dans plusieurs végétaux et dans des liquides d'origine animale comme chez les lampyres et les fulgores; elle se manifeste dans le frottement de corps, comme le quartz, le diamant, etc., ou en chauffant des minéraux comme le diamant, le spath fluor, la chaux phosphatée; enfin, on peut l'observer dans un grand nombre de circonstances, que l'on fera connaître dans la suite de cet ouvrage.

On a dû connaître dès la plus haute antiquité certains effets de phosphorescence des corps organisés, car ils apparaissent naturellement sans le secours d'aucune action extérieure; tels sont les effets lumineux produits par les lampyres et le dégagement de lumière observé avec certains bois ainsi que sur des animaux marins, et principalement sur les infusoires qui donnent lieu au phénomène de phosphorescence de la mer. Ce-

pendant Aristote dans l'histoire des animaux ne cite les lampyres (πυρολαμπιδες) que comme étant compris dans le genre des insectes qui sont, les uns ailés, les autres sans ailes (1), ou bien provenant de certaines chenilles noires et velues qui ne sont pas fort grandes (2). Leur nom indique bien leur faculté lumineuse, dont il ne s'est pas cependant occupé spécialement.

Dans ses trois livres sur l'âme (3), il dit : « Il y a certaines choses qui « ne sauraient être vues à la lumière ; elles frappent néanmoins les sens, « et se font voir dans l'obscurité ; telles sont celles qui brillent comme « du feu, et qui n'ont pas de nom commun dont on puisse les nommer ; « ainsi sont le bois de chêne, certaines cornes, les têtes, les écailles et « les yeux de certains poissons..... La raison pour laquelle on voit ces « objets la nuit appartient à un autre sujet. »

Voici ce que Pline rapporte à propos des animaux phosphorescents : « Pendant la nuit les lampyrides brillent comme des feux, par la cou- « leur éclatante de leurs flancs et de leur croupe; étincelants lorsqu'ils « déploient leurs ailes, cachés dans l'ombre quand ils les ferment (4). »

Et avant ce passage, à propos des dactyles ou dails, il dit : « Leur pro- « priété est de reluire dans les ténèbres : plus ils contiennent de liquide, « plus ils brillent, et dans la bouche de ceux qui les mangent et sur les « mains; les gouttes même qui tombent à terre ou sur les habits jet- « tent le même éclat : en sorte qu'on trouve dans une liqueur une pro- « priété qu'on admirerait même dans un corps solide (5). »

Depuis cette époque les différents auteurs qui ont écrit sur l'histoire naturelle ont rapporté avec plus ou moins de détails des faits analogues. Boyle (6), à la fin du dix-septième siècle, Spallanzani, puis, au commencement de ce siècle, Hulme (7) et Dessaigne (8) peuvent être cités parmi

(1) Aristote, *Histoire des animaux*, liv. 5, chap. 1er.

(2) Id., ibid., liv. 5, chap. 19.

(3) Liv. 11, chap. 7. « De la vue et de ce qui est visible. »

(4) « Lucent ignium modo noctu, laterum et clunium colore, lampyrides, nunc penna- « rum hyatu refulgentes, nunc vero compressu obumbratæ, non ante matura pabula, aut « post desecta conspicuæ. » (Pline, liv. 11, chap. 28 ; traduction d'Ajasson de Gransagne, t. 8, p. 773.)

(5) « His natura in tenebris remoto lumine, alio fulgere claro, et quanto magis humo- « rem habeant, lucere in ore mandentium, lucere in manibus, atque etiam in solo ac « veste, decidentibus guttis : ut procul dubio pateat, succi illam maturam esse, quam « miraremur etiam in corpore. » (Pline, liv. 9, ch. 61 ; trad. d'Ajasson, t. 7, p. 150.)

(6) Boyle, *Opera omnia*, t. 3.

(7) *Philosophical transactions*, 1800 et 1801, t. 90 et 91.

(8) *Journal de physique*, t. 68, et t. 69, p. 26.

ceux qui ont fait des recherches intéressantes sur différentes conditions physiologiques des phénomènes de phosphorescence des animaux. Il en sera question dans le livre VII, en même temps que l'on parlera des différents travaux faits dans ces dernières années.

Vers le milieu du seizième siècle Conrad Gesner, médecin (1), réunit les opinions des anciens sur la production de la lumière dans certains végétaux, et rapporta tous les faits connus, fabuleux ou réels, qui touchent à ce sujet. Des recherches intéressantes ont été publiées depuis par d'éminents botanistes; il en sera également question dans le livre VII, qui est consacré à l'étude de l'émission lumineuse dans les corps organisés. D'après les résultats obtenus, il est à présumer que les effets lumineux tiennent à des actions chimiques lentes qui accompagnent ou suivent la vie végétale.

§ 2. *Minéraux supposés lumineux. Escarboucle, anthrax, pyrope, etc.*

Si les anciens ont pu observer une émission spontanée de lumière dans les corps organisés, il ne paraît pas qu'ils aient connu quelques-uns des effets de phosphorescence des minéraux. Théophraste, disciple d'Aristote, quatre siècles avant Pline, dans son *Traité des pierres*, où il fait mention des propriétés attractives de l'ambre et de la pierre de lynx (probablement la tourmaline) ainsi que de l'action de la pierre d'aimant sur le fer, n'aurait pas manqué de signaler les faits de ce genre qui auraient été connus à cette époque. Il parle bien de l'escarboucle , et il dit (2) : « La couleur en est rouge, et telle que quand on tient la pierre « exposée au soleil, elle ressemble à un charbon ardent. » Mais cette indication se rapporte à la couleur de la pierre vue par diffusion ou par transmission et non pas à un phénomène d'émission lumineuse par action propre. Les anciens nommaient en effet escarboucles les grenats et les rubis, dont la couleur est rouge, mais qui n'offrent aucune phosphorescence de quelque durée quand on les échauffe ou qu'on les expose à la lumière.

Pline, en parlant des pierres précieuses, dit :

« Au dedans de la phlogitis semble brûler une flamme concentrée. « Dans l'anthracite on voit voler çà et là des étincelles (3). »

(1) De raris et admirandis herbis quæ sive quod noctu luceant, sive alias ob causas, lunariæ nominantur commentatoribus; et obiter de aliis etiam rebus quæ in tenebris lucent; 1556.

(2) Theophraste, *Traité des pierres*, § 31.

(3) « In phlogitide intus ardere quædam videtur flamma, quæ non exeat. In anthraci-

L'anthracite ou plutôt l'anthrax des anciens n'est autre que l'escarboucle, c'est-à-dire le rubis, le spinelle ou le grenat.

Plus loin, en parlant encore de ces pierres, il dit « qu'arrosées d'eau elles brillent comme la flamme (1) ».

L'astérie « contient des rayons lumineux comme la prunelle.. », et la pierre appelée ceraunia... « s'imprègne de l'éclat des astres (2) ».

Il paraît certain que Pline en parlant de ces minéraux a eu en vue, comme Théophraste, les effets produits par la lumière extérieure, et qui doivent se rapporter à des effets de couleur et d'éclat. Du reste la description qu'il donne de l'escarboucle conduit à la même conclusion. S'il avait eu connaissance d'effets particuliers d'émission de lumière, il les aurait certainement cités, de même qu'il a parlé de la lumière émise par les corps organisés.

Solin, deux siècles après, s'exprime à peu près dans les mêmes termes; il dit, par exemple :

« Où se trouve l'hyacinthe se rencontre la chrysoprase : la lumière « cache cette pierre, l'obscurité la fait apparaître. Il y a en elle une telle « diversité que la nuit elle est de feu, le jour elle est pâle (3). »

Et plus loin : « La phlogitis montre intérieurement comme des « flammes brûlantes. L'anthracite brille comme par des rayons scintil- « lants (4). »

Il n'y a pas à s'arrêter à la fable d'Élien (5) au sujet d'une pierre qui était lumineuse pendant la nuit et qu'une cigogne laissa tomber dans le sein d'une femme de Tarente.

Isidore de Séville, dont les œuvres renferment un résumé des connaissances humaines au commencement du septième siècle, en parlant de la pierre appelée Ceraunia par Pline, ou pierre de foudre, parle d'une pierre bleue qui exposée au jour s'imprègne de rayons de lumière (6). Mais est-ce bien de la lumière émise par l'action propre du corps dont

« tide scintillæ discurrere aliquando videntur ». (Pline, liv. 37, chap. 11; traduct. d'Ajasson, t. 20, p. 124.)

(1) « Contra aquis perfusæ exardescunt », liv. 37, chap. 27.

(2)... «..... quæ fulgorem siderum rapiens », livre 37, chap. 51.

(3) « Ubi hyacinthus, ibi et chrysoprasus apparet : quem lapidem lux celat, produnt « tenebræ. Hæc enim est in illo diversitas, ut nocte igneus sit, die pallidus. » Chap. 30.

(4) « Phlogitis ostendat intra se quasi flammas æstuantes. Anthracites coruscat velut scintillantibus stellis. » Chapitre 37.

(5) Élien, *Des animaux*, livre 8, chapitre 22. περι του πελαργου, etc....

(6) « Splendet tamen cœruleo, et si sub divo positus fuerit, fulgorem rapit siderum. » Isidore de Séville, livre 16, chap. 13, *De cristallis*.

il est question ici? ou n'est-ce pas plutôt de la lumière diffusée? Cette dernière opinion est d'autant plus probable qu'il se sert à peu près des mêmes expressions que Pline.

Dans le chapitre suivant « De ignitis », il dit : « L'escarbouche est « de feu comme le charbon, et son éclat n'est pas obscurci par la nuit. « Il luit dans les ténèbres à tel point qu'il lance des flammes vers les « yeux (1). »

En parlant ensuite, dans le même chapitre, de la chrysoprase et de la phlogitis, il se sert à peu près des expressions de Solin rapportées ci-dessus.

Albert surnommé le Grand, dans son traité *De mineralibus,* parle à plusieurs reprises de l'escarboucle et du diamant; mais on ne voit pas que les effets dont il s'occupe soient bien nettement définis. A propos de l'escarboucle, il dit (2) :

« Sa qualité particulière est de chasser de l'air les poisons vaporeux, « et quand il est vraiment bon, il luit dans les ténèbres comme du char- « bon, et je l'ai vu ainsi. Mais quand il est moins bon et cependant véri- « table, il brille dans les ténèbres en répandant sur lui de l'eau claire « et limpide dans un vase noir net et poli. »

Dufay, dans un travail fait en 1735, dont il sera question plus loin, à propos de la lumière que le diamant émet quand on le place dans l'eau chaude, ajoute que cette expérience paraissait avoir été connue d'Albert le Grand. Mais Albert, comme on le voit, parle d'eau claire et limpide, mais non pas d'eau chaude; il revient plusieurs fois sur le même sujet. Albert n'avait donc pas observé le phénomène d'émission lumineuse par élévation de température, et ce qu'il dit doit se rapporter à des effets de diffusion.

Benvenuto Cellini a fait mention de pierres lumineuses dans son traité sur la bijouterie publié dans le seizième siècle. Il ne cite cependant qu'une seule observation personnelle : il assure que du temps de Clément VII il vit un escarboucle entre les mains d'un marchand de Raguse; que cette pierre était blanche comme les rubis blancs, et qu'elle retenait en elle une lumière si agréable et admirable qu'on la voyait briller

(1) « Carbunculus autem dictus quod sit ignitus, ut carbo, cujus fulgor nec nocte vincitur. Lucet enim in tenebris adeo ut flammas ad oculos vibret. »

(2) « Specialis tamen effectus ejus est venenum aereum et vaporosum fugare, et quando « vere bonus est, lucet in tenebris sicut carbo, et tale vidi ego. Quando autem minus bo- « nus est et tamen verus, emicat in tenebris superfusa aqua clara et limpida in vase « nigro mundo et polito ». *De mineralibus*, etc., liv. 2, 2e partie, chap. 3.

dans les ténèbres. Il ajoute que cette lumière n'était pas aussi vive que celle des escarboucles de couleur, mais qu'il l'avait vue dans l'obscurité briller comme un feu qui commence à s'éteindre (1). Il cite ensuite un fait qu'on lui aurait raconté et d'après lequel une personne aurait trouvé dans une vigne un escarboucle de couleur, lumineux pendant la nuit; mais il n'en a pas été témoin.

Si réellement il a observé l'effet cité plus haut et s'il n'a pas été trompé par une illusion d'optique, en confondant la lumière réfléchie dans un endroit peu éclairé avec la lumière que le corps pouvait émettre par action propre, ce serait un des faits les plus anciennement connus et bien constatés se rapportant à des pierres lumineuses par elles-mêmes. Le résultat n'a pas paru convaincre les savants de cette époque; car ceux qui se sont occupés des pierres précieuses et des minéraux, et dont les ouvrages sont les plus estimés, ont révoqué en doute l'observation des faits de ce genre.

On peut citer à ce sujet l'ouvrage de Boëce de Boot, médecin de l'empereur Rodolphe II, publié au commencement du dix-septième siècle, ainsi que celui de Jean de Laët.

L'ouvrage de Boëce a eu un grand nombre d'éditions, et l'une d'elles a été traduite et annotée par André Toll, médecin à Leyde (2). Je rapporterai en entier l'article relatif à l'escarboucle en conservant intacte la traduction (3) :

« L'on faict grand estat de l'escarboucle; l'on dict qu'il luit dans « les ténèbres, comme un charbon, peut-estre que pour cela il a esté « appelé des anciens pyrope ou anthrax. Mais pour dire le vray, jus- « ques à présent personne n'a osé asseurer d'avoir veu une pierre pré- « cieuse luire de nuict. Garcias ab Horto, médecin du vice-roy des Indes, « escrit qu'il a parlé à des personnes qui affirmaient en avoir veu, « mais il ne leur a pas baillé sa croyance.

« Louis Vertoman rapporte que le Roy de Pegu en porte de telle « grandeur, et splendeur, que quiconque regarde le roy dans les té- « nèbres, il le voit resplendir, comme s'il estait illuminé par le soleil.

(1)... « Ma riteneva in se un fulgente tanto piacevole e mirabile, che egli risplendeva « nelle tenebre, ma non quanto i carbonchi colorati, ben è vero, che in luogo oscurissimo « io lo vidi rilucere in guisa d'un fuoco alquanto smorto ». *Dell' oreficeria*, chapitre 1er.

(2) *Le parfait joaillier, ou histoire des pierreries*, par A. Boëce de Boot, traduit et annoté par A. Toll ; Lyon, 1644.

(3) Id. liv. 2, ch. 8.

« Mais ny luy aussi ne l'a pas veu. Si donc la nature produit une pierre « précieuse luisante de nuict, ce sera véritablement un escarboucle ; et « par ainsi il sera distingué des autres pierres précieuses, et surpassera « toutes les autres en dignité.

« Plusieurs croyent que les pierres précieuses qui luisent de nuict « ne peuvent pas estre formées par la nature, mais ils se trompent. Car, « comme la nature peut bailler aux bois pourris, aux vers qui luisent « de nuict, aux escailles des sardines et aux yeux des animaux un es- « clat et lumière, je ne vois pas pourquoi elle ne puisse pas bailler « cette lumière aux pierres précieuses dans l'abondance de tant de cho- « ses créées, la matière propre et disposée estant substituée. Or pour « sçavoir s'il s'en trouve ou non, il est incertain jusqu'à présent. Pour- « tant, selon l'opinion des personnages très-doctes, il ne se trouve point « de pierres précieuses de ceste nature. D'où vient que toutes les pierres « précieuses rouges et transparentes sont appellées par iceux escarbou- « cles, anthrax, pyropes et charbons ? Parce qu'elles imitent la lueur « d'un charbon et qu'elles jettent leurs rayons de tous costés tout ainsi « que le feu. »

Jean de Laët, à peu près à la même époque, à la suite d'une traduction de Théophraste, a publié un ouvrage en deux livres sur les pierres précieuses, dans lequel il est arrivé à la même conclusion (1) :

« Les anciens ayant nommé ces pierres escarboucles, pyropes, an- « trax, on a cru généralement qu'elles brillaient dans les ténèbres comme « du charbon enflammé, quoique de nos jours cette propriété n'ait été « reconnue dans aucune pierre, malgré qu'on se soit hasardé à le dire. « Les plus habiles joailliers mettent hors de doute que Pline a compris « sous le titre d'escarboucles toutes les pierres transparentes de couleur « rouge et comme ardente ; nous les appelons maintenant rubis, grenats, « almandins et hyacinthes rouges . »

Ces diverses citations montrent donc que dans l'antiquité et même parmi les modernes des auteurs ont cru à l'existence des pierres lumineuses sans que cette existence ait été bien constatée. Aujourd'hui

(1) « Quia autem carbunculi, pyropi, et anthraces a veteribus nominantur, vulgo cre- « ditum fuit, carbonis instar in tenebris lucere, quod tamen in nulla gemma hactenus « deprehensum, licet a quibusdam temere jactetur. Peritissimis autem gemmariis haud « dubium est Plinium et alios veteres sub carbunculorum titulo descripsisse gemmas « omnes translucidas rubri coloris et quasi ardentis, quales nostro ævo appellantur rubini, « granati, almandini et hyacinthi rubentes ». *De gemmis et lapidibus....*, liv. 2, chap. 2, p. 10 ; Lyon, 1648.

que l'on sait que les grenats, rubis, spinelles et la plupart des pierres colorées en rouge nommées escarboucles, pyropes, anthrax, par les anciens, ne sont pas lumineuses après l'insolation, du moins d'une manière persistante, à moins d'employer des procédés particuliers, et que les diamants ainsi que certaines pierres à base terreuse comme des spath fluors et des calcaires, etc., possèdent seules cette faculté à un degré tel qu'on ait pu l'observer dans les conditions dont il est fait mention; en remarquant en outre que les anciens n'ont pas mentionné les diamants parmi les pierres lumineuses, on doit conclure qu'ils ont confondu les effets d'éclat et de coloration produits par la réflexion et la transmission de la lumière dans les minéraux avec les effets qui seraient produits par une émission de lumière en vertu d'une action propre de ces corps. Cela semble d'autant plus naturel qu'on sait qu'ils expliquaient généralement les phénomènes de la vision par une sorte d'émanation des corps; d'après cette supposition, la couleur rouge des pierres a dû contribuer à leur faire penser que les effets lumineux produits se rapprochent de ceux que présentent des charbons enflammés.

# CHAPITRE II.

**Découvertes faites dans le dix-septième siècle. — Pierre de Bologne. — Phosphorescence du diamant. — Phosphore.**

## § 1. *Pierre de Bologne. — Diamant lumineux.*

En 1602 ou 1603 (1) une découverte due au hasard vint montrer la possibilité de réaliser avec une substance facile à préparer l'effet que

(1) P. Pothier d'Angers, médecin, *Pharmacopea spagirica*, livre 2, dernier chapitre, 3me édit., p. 264; 1635.

F. Licetus, *Litheosphorus, sive de lapide bononiensi*, etc.., 1640, ch. 3, p. 13.

Mémoires de l'Acad. des sciences de Paris, collection académique, partie étrangère, t. 4, p. 108.

C. Mentzelius, *Traité sur la pierre de Bologne;* 1675.

Lemery, *Cours de chimie.*

l'on supposait devoir être produit par l'escarboucle et les autres minéraux prétendus lumineux. Cette découverte a été faite, dit-on, par un artisan de Bologne (on a même dit un cordonnier), nommé Vincenzo Casciorolo, qui s'occupait d'alchimie et qui ayant trouvé une pierre luisante et très-pesante croyait qu'elle renfermait de l'argent et l'avait calcinée; au lieu de cela, il découvrit le curieux phénomène qu'elle présente de rester lumineuse dans l'obscurité pendant quelque temps, après son exposition à la lumière, en donnant une lueur qui s'éteint graduellement. Cette pierre en effet était du sulfate de baryte, qui étant calciné entre des charbons s'était changé superficiellement en sulfure de barium phosphorescent.

Boëce de Boot et Jean de Laët, cités plus haut, ont publié leurs ouvrages près de cinquante ans après la découverte des propriétés lumineuses de la pierre de Bologne; s'ils ont eu connaissance de ce fait, il est digne de remarque qu'ils n'ont pas songé à établir quelque rapport entre les effets que présentait cette matière et ceux que la tradition attribuait aux pierres prétendues lumineuses, en remarquant surtout, comme ils l'ont fait, que des corps organisés pouvaient jouir spontanément de la faculté de devenir des sources de lumière. Mais il est possible, d'un autre côté, qu'ils n'aient pas eu connaissance des propriétés lumineuses dont il s'agit; car Lemery, dans son cours de chimie, en parlant de la pierre de Bologne, dit qu'Homberg a contribué à rappeler l'attention sur cette pierre, qui avait été presque oubliée. Dans un voyage qu'il fit en Italie, dit-il, pour la rechercher, on la connaissait si peu à Bologne qu'Homberg n'y trouva personne qui pût lui en donner des nouvelles et très-peu qui en eussent entendu parler..... En outre, la plupart des personnes croyaient que la pierre de Bologne était une composition dont le secret était perdu.

La pierre de Bologne a donné lieu à un grand nombre de publications et même à des traités spéciaux au sujet de sa préparation. On peut citer, par ordre de dates, comme les plus importants le mémoire d'Ovide Montalbani, médecin à Bologne (1); un des chapitres de la pharmacopée de Pothier d'Angers, médecin, dans lequel il décrit la préparation de la matière (2); le traité de Licetus, cité plus haut, qui date de 1640 et qui donne une histoire complète de la découverte, de la préparation et

(1) Ov. Montalbani, *De illuminabili lapide bononiensi epistola familiaris;* 1634.
(2) *Pharmacopea spagirica*, ouvrage cité plus haut

des principales propriétés de cette substance; le traité de Mentzelius, publié en 1675 et indiqué aussi précédemment; un mémoire du comte de Marsiglii (1), le fondateur de l'Académie de Bologne, en 1712; enfin, les ouvrages de Lemery (2) et de Margraff (3).

C'est à peu près au milieu du dix-septième siècle que le nom de phosphore fut appliqué à cette substance, comme aux autres matières émettant dans l'obscurité une lueur plus ou moins vive. Pothier appelle la pierre de Bologne la pierre lucifer; Licetus lui a donné, vers 1640, le nom de litheosphore; Baudoin, en 1675, donna au nitrate de chaux calciné, dont on parlera plus loin, le nom de phosphore hermétique. Boyle s'est servi de la même expression, et nous verrons ci-après qu'on a donné tout aussi bien le nom de phosphore au phosphore ordinaire qu'aux substances ou aux préparations chimiques qui luisent par elles-mêmes sous l'influence de la chaleur, de la lumière ou du frottement.

Les méthodes de préparation indiquées pour la pierre de Bologne peuvent se réduire à deux : dans la première on pulvérise la substance, l'on forme avec la poudre humectée d'eau, ou d'albumine, des gâteaux, qui une fois secs sont disposés par couches avec de la braise calcinée; ce mélange est ensuite placé dans un fourneau où l'on opère la calcination jusqu'à ce que le fourneau s'éteigne, et l'on ne retire la matière qu'après le refroidissement complet. Si par cette opération elle n'offre pas une lumière assez vive après l'insolation, on la calcine de la même manière une seconde et même une troisième fois. C'est la méthode donnée par Pothier et suivie par Mentzelius; Margraff l'a perfectionnée en faisant subir une première calcination à la matière, la pulvérisant ensuite et formant les gâteaux avec de l'eau qui tient en dissolution $\frac{1}{7}$ de son poids de gomme adragante.

La seconde méthode consiste à faire adhérer autour de morceaux de pierre de Bologne elle-même de la poudre de même substance, et à opérer la calcination au milieu du charbon. Elle a été suivie par Marsiglii et Lemery. C'est encore la poussière de sulfate de baryte qui devient lumineuse après son exposition à la lumière, et comme les pierres qui sont au centre de chaque masse ne servent que de support, la première méthode est préférable.

(1) *Dissertatione epistolare del fosforo minerale, o sia della pietra illuminabile bolognese;* 1698; réimprimée, en 1702.

(2) *Cours de chimie.*

(3) Margraff, *Opuscules chimiques*, 12me dissertation, Paris, édition de 1762, t. 1, p. 312.

Quand on expose à l'insolation des masses ainsi calcinées et qu'on les transporte dans l'obscurité, elles y luisent en général avec une teinte orangée rouge, analogue à celle du charbon qui s'éteint; quelquefois cependant cette teinte est plus jaunâtre ou entremêlée de parties blanchâtres et bleuâtres. Margraff en opérant à deux ou trois reprises la calcination des gâteaux, comme l'indique Pothier, après avoir pulvérisé chaque fois la matière, et en se servant d'une moufle, a obtenu des teintes mélangées. On verra plus tard quelles sont les conditions à remplir pour avoir une grande uniformité de couleur dans la lumière émise.

En 1663, une observation faite par Robert Boyle (1) avec un diamant qui était lumineux dans l'obscurité après avoir été frotté, chauffé, ou approché d'une bougie, attira l'attention sur les effets de phosphorescence que pouvaient donner les minéraux. Boyle reconnut bientôt que d'autres diamants jouissaient des mêmes propriétés, mais qu'il y en avait qui en étaient privés. On verra dans le chapitre suivant que beaucoup d'autres corps présentent des effets analogues, et se trouvent naturellement dans les mêmes conditions que la pierre de Bologne calcinée.

### § 2. *Phosphore.*

En 1677, la découverte du phosphore vint montrer qu'une matière pouvait produire de la lumière par elle-même, au milieu de l'air, et sans le concours de la lumière, de la chaleur ou du frottement, et dès lors les recherches des chimistes sur cette matière firent oublier en partie celles relatives aux substances qui ne possédaient que temporairement la propriété de luire dans l'obscurité.

Il n'est pas sans intérêt de dire quelques mots de cette découverte chimique importante (2). Un négociant de Hambourg nommé Brandt, voulant réparer sa fortune, s'occupait d'alchimie et travaillait sur l'urine, espérant arriver à la pierre philosophale ; au lieu de ce qu'il cherchait, il découvrit le phosphore. Kunckel, alors professeur à Vittemberg et dont la réputation comme chimiste était très-grande, en entendit parler, et en fit part à Krafft de Dresde, afin de se réunir à lui pour acheter ensemble le procédé. Krafft, à ce qu'il paraît, fit le voyage de Hambourg et acheta le secret de Brandt moyennant 200 dollars, à condition qu'il ne le révé-

(1) *De adamante in tenebris lucente,* 27 octobre 1663. — Id. Boyle, *Opera omnia*, t. 3, p. 152.

(2) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 55, p. 342, 1737.

lerait à personne. Kunckel, d'après ce qu'il rapporte, outré de la conduite de son ami, travailla de son côté, et sachant que Brandt employait l'urine, opéra sur cette matière, et après de longs essais parvint à en retirer du phosphore. Il publia le procédé de préparation, et c'est par ce motif que pendant longtemps cette matière a pris le nom de phosphore de Kunckel. Boyle, vers cette époque, s'occupa aussi de ce sujet, et indiqua également le moyen dont il se servait pour obtenir cette substance (1).

Cependant la préparation était difficile, et le phosphore était assez rare; mais en 1737 (2) un étranger, s'étant rendu à Paris, offrit de faire connaître un procédé qui fut soumis à l'examen d'une commission de l'Académie des sciences, composée de Dufay, de Duhamel, de Geoffroy et de Hellot, et le gouvernement français lui accorda une récompense. La méthode de préparation fut décrite avec détails par Hellot, rapporteur de la commission ; elle consistait à évaporer l'urine putréfiée et à chauffer ensuite fortement le résidu dans une cornue en grès dont le col, par une allonge, plongeait dans l'eau. Quelques années après, en 1743 (3), Margraff fit voir quelle était la substance qui dans l'urine donnait le phosphore, et conseilla l'addition, dans la matière, d'un sel de plomb. Enfin Gahn, en 1769, ayant découvert la présence du phosphore dans les os, publia avec Schèele un procédé qui permet de s'en procurer aisément des quantités un peu grandes. C'est ce procédé modifié que l'on emploie encore aujourd'hui.

# CHAPITRE III.

## Recherches entreprises depuis le commencement du dix-huitième siècle jusqu'en 1840.

### § 1. *Phosphorescence par les actions mécaniques.*

Depuis la découverte du phosphore les recherches des physiciens et surtout des chimistes furent dirigées principalement vers l'étude de ce corps;

(1) Boyle, *Noctiluca aeria*, etc., 1693. — *Opera omnia*, t. 3.
(2) Voir *Mémoires de l'Académie des sciences* pour 1737, cités plus haut.
(3) *Opuscules chimiques* de Margraff, édit. de Paris, 1762, t. 1, p. 1 et 30.

on reconnut bien la différence entre les effets produits par le phosphore proprement dit et ceux que présentent les corps phosphorescents, puisque le phosphore avait besoin d'air pour luire, et qu'il luisait alors sans le secours d'aucune action extérieure, tandis que les corps phosphorescents pouvaient luire dans le vide, sous l'eau, mais par l'action du frottement, de la chaleur ou de la lumière. Des recherches n'en continuèrent pas moins pendant tout le dix-huitième siècle, en soumettant les minéraux et les matières organiques à des actions analogues à celle que l'on avait fait subir à l'urine ; c'est même en faisant des expériences de ce genre que Homberg découvrit, en 1711 (1), la préparation d'un composé qui reçut aussi le nom de phosphore, en calcinant des matières fécales avec de l'alun : il se faisait du sulfure de potassium, qui prenait feu à l'air. On nomma ce nouveau phosphore pyrophosphore, et ensuite simplement pyrophore. D'autres matières organiques donnèrent des effets semblables, et Lemery fils fit également plusieurs préparations analogues.

Les recherches de Boyle en 1663 furent pour ainsi dire le point de départ des travaux relatifs à la phosphorescence des minéraux; on reconnut alors que le frottement, la chaleur ou l'action de la lumière pouvaient donner à certains corps la propriété de luire dans l'obscurité. Il faut examiner dans chaque classe de phénomènes quelles ont été les découvertes qui ont été faites.

En ce qui concerne les actions mécaniques, on peut citer l'effet lumineux observé par Homberg, en 1693 (2), quand on frappe le chlorure de calcium fondu provenant de la calcination de la chaux mélangée à l'état de poudre avec moitié de son poids de sel ammoniac; c'est un fait très-curieux, et qui paraît montrer nettement l'influence des actions mécaniques sur la production de la lumière.

En 1707 (3), Bernoulli et Cassini fils firent quelques expériences sur le dégagement de lumière dans le frottement des diamants et de plusieurs corps ; ils observèrent évidemment dans quelques cas des lueurs électriques, et dans d'autres des effets analogues à celui que Boyle avait cité. Dufay, dans ses recherches (4), de 1730 à 1735, a également parlé de la phosphorescence par frottement.

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences,* t. 28, p. 234, 1711.
(2) *Ibid.*, t. 10, p. 307, volume 15e (1693).
(3) *Ibid.*, t. 24, p. 1 (1707).
(4) *Ibid.*, t. 53, p. 347 (1735).

Les recherches d'Hawksbée (1), sur le frottement des corps dans le vide et dans les gaz et sur le dégagement d'électricité et de lumière qui a lieu dans cette circonstance, avaient montré, comme celles de Boyle et celles de Dufay, et même antérieurement à ces dernières, que la production de la lumière pouvait être indépendante de celle de l'électricité, puisque des corps lumineux et électriques par le frottement pouvaient perdre leur électricité et rester encore lumineux; cependant elles n'avaient pas établi que dans quelques cas l'élévation de température qui a lieu quand on frotte les corps qui deviennent lumineux ne fût pas la cause du phénomène, et qu'il ne se produisît pas alors un effet de phosphorescence par la chaleur.

Tel se trouve peut-être le cas du diamant. Cependant, quelques-uns des effets observés par Hawksbée, ainsi que le fait cité par Homberg, semblent ne devoir leur explication qu'à la production d'un phénomène de phosphorescence par des actions mécaniques.

Après ces recherches, on ne peut guère citer comme se rapportant à ce sujet que les observations faites en 1809 par Dessaignes (2), qui a mentionné des matières salines, comme les chlorures de mercure ainsi que le phosphate de ce métal, lesquelles produisent de la lumière au moment où on les broye. Il a montré qu'avec certains corps, comme la chaux phosphatée, le phosphore de Canton agglutiné, le frottement ne donnait lieu à une émission de lumière qu'en échauffant ces corps, et que si on les privait du pouvoir d'être phosphorescents par la chaleur, ce qui a lieu en les soumettant préalablement à l'action d'une température élevée, ils ne produisaient plus ce phénomène; mais il a fait voir qu'il y avait d'autres corps, comme certains silicates, des fragments de chaux, etc., qui, étant revenus à la température ordinaire après calcination, étaient encore lumineux par le choc. Ainsi, dans certains cas, l'action mécanique est bien une cause de dégagement de lumière.

### § 2. *Phosphorescence par l'action de la chaleur.*

Les phénomènes de phosphorescence par la chaleur ont été surtout étudiés à la fin du siècle dernier et au commencement de celui-ci. On savait depuis Boyle que les diamants chauffés pouvaient devenir lumi-

(1) *Physico-mecanical experiment.*, 1709. — *Id.*, traduction de Bremond, annotée par Desmarets (1754)

(2) *Journal de physique*, t. 69, p. 20. — *Id.*, t. 73, p. 41. — *Id.*, 74, p. 101.

neux; on connaissait également une substance, nommée phosphore Smaragdin (1), qui, de même que la pierre de Berne envoyée à l'Académie des sciences (2), était lumineuse par élévation de température; ces deux dernières substances étaient très-probablement, d'après leur description, du fluorure de calcium.

Dufay (3) montra que plusieurs pierres précieuses se trouvaient dans le même cas. Il fut conduit à deux remarques très-importantes : la première, que les minéraux phosphorescents par la chaleur perdaient, étant suffisamment calcinés, cette faculté et étaient incapables de redevenir lumineux par élévation de température; la seconde, que l'action de la chaleur tout en faisant perdre temporairement à ces mêmes corps, comme au phosphore de Bologne, la faculté de luire dans l'obscurité, ne changeait aucunement leur pouvoir, quand ils étaient revenus à la température ordinaire, de devenir lumineux dans l'obscurité après chaque exposition à la lumière du jour; c'est-à-dire qu'il y avait indépendance entre ces deux espèces de phosphorescences : phosphorescence par élévation de température, et phosphorescence par l'action de la lumière.

Depuis Dufay on a étendu la liste des corps phosphorescents par la chaleur, mais sans que l'on puisse connaître les causes qui donnent aux substances minérales cette propriété. On doit citer principalement, après ses recherches, le travail de Wedgwood publié en 1792 (4), dans lequel ce phénomène est étudié avec un certain nombre de minéraux.

Haüy (5) voulut faire de la phosphorescence un caractère minéralogique, et à propos des matières comme le spath fluor, la dolomie, etc., il indiqua les effets de phosphorescence que pouvaient produire la chaleur et le frottement.

En 1809, l'Académie des sciences de Paris couronna un mémoire de Dessaignes sur les phosphorescences, mémoire dont on a déjà parlé plus haut, et dans lequel il étudia le genre de phosphorescence dont il est question ici. Après avoir vérifié les faits connus avant lui, il arriva à des résultats très-curieux, et relatifs à la propriété que possède l'étincelle électrique excitée à distance de substances privées par la calcination de leur phosphorescence par la chaleur de rendre à ces substances le pouvoir d'être lumineuses par élévation de température.

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences,* t. 2, p. 129.
(2) *Id.*, t. 42, p. 58 (1724).
(3) *Id.*, t. 53, p. 352 (1735).
(4) *Philosoph. transact.*, t. 82, p. 28.
(5) Haüy, *Traité de minéralogie* (t. 1 à 4).

Déjà on avait vu que la lumière électrique, comme les lumières artificielles, pouvait impressionner les corps phosphorescents; on verra en effet plus loin que Canton, en 1764, avait parlé de ce résultat et que Wilson avait même fait voir que l'activité communiquée aux coquilles d'huître par les décharges électriques était supérieure à celle que donnait la lumière solaire. Michel de Grosser avait également obtenu le même effet avec des diamants. Dessaignes étendit ces résultats à d'autres matières que les coquilles calcinées. Voici un des passages de son mémoire :

« Si l'on prend de la poudre de verre rendue imphosphorescente par « calcination, qu'on l'établisse sur un support isolant entre les deux « boules d'un excitateur universel, et que dans cet état l'on oblige la « décharge d'une bouteille de Leyde à passer par les tiges de l'excitateur « et à traverser le petit tas de poudre, celle-ci se trouvera réintégrée « dans sa phosphorescence après quatre ou cinq explosions de bouteil- « les. En effet, si on la jette sur un support chaud, même après l'avoir « maniée longtemps dans les mains, elle y produit une vive scintillation, « parfaitement semblable à celle de la phosphorescence naturelle.

« J'ai redonné par ce moyen à toutes les substances minérales de la « nature leur propriété phosphorique; je ne pense en excepter aucune; « j'ai exposé de la poudre imphosphorescente et électrisée à l'air atmos- « phérique sur une plaque de zinc pendant plus de six mois, pour voir « si l'influence d'un support métallique et les variations de l'air lui ra- « viraient son fluide : elle a répandu après cette épreuve autant d'éclat « sur la cuiller que le premier jour de son électrisation (1). »

On voit d'après cela que Dessaignes avait rendu aux corps au moyen des étincelles électriques la propriété d'émettre de la lumière par élévation de température; mais il pensait que l'effet était dû à l'influence spéciale de l'électricité.

A la même époque, et pour le même concours de l'Académie des sciences de Paris, Placidus Heinrich, professeur à Ratisbonne, envoya un ouvrage très-étendu et fort intéressant, mais qui ne fut mis qu'au second rang (2). Dans cet ouvrage il parla de la phosphorescence par élévation de température et par insolation, et, comme Dessaignes, il montra que l'électricité peut rendre aux minéraux la phosphorescence qu'ils ont perdue.

(1) *Journal de physique*, t. 68, p. 465; 1809. — *Id.*, t. 71, p. 67.

(2) Voir *Journal de physique*, t. 74, p. 311. — Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 vol., t. 6, p. 269.

Seulement, suivant lui la cause de ce phénomène n'était pas due à une action spéciale de la part de l'électricité, comme le pensait Dessaignes, mais bien à l'influence de la lumière électrique. Canton et Wilson pensaient également que les étincelles agissaient par leur lumière, et nous verrons plus loin que cette opinion est celle qui doit être adoptée.

En outre de ces recherches on peut citer celles de Théodore de Saussure (1), qui a examiné quelle était l'influence du fer ou d'autres matières sur la phosphorescence du spath fluor et de quelques composés à base de chaux; celles de Grotthus (2), de Brewster (3), qui a montré que la phosphorescence par la chaleur se produisait avec un grand nombre de minéraux, ainsi que les recherches de Pearséal (4). Ce dernier a fait des expériences analogues à celles de Dessaignes et de Placidus Heinrich sur la propriété que possèdent les décharges électriques de rendre la phosphorescence par la chaleur aux corps qui l'ont perdue; mais il a de plus observé que certains spaths fluors qui avaient perdu leur couleur en même temps que leur phosphorescence reprenaient une légère coloration au moyen de cette influence. Ce sujet sera étudié dans le livre III, et l'on reviendra sur ces derniers travaux.

### § 3. *Phosphorescence par l'action de la lumière.*

Depuis deux siècles, la phosphorescence par l'action de la lumière a été étudiée concurremment avec celle que peut faire naître la chaleur, et cela en partie par les mêmes savants. Après le travail de Boyle et avant la découverte du phosphore par Brandt, Baudoin (5), en 1675, montra que le résidu de la calcination du nitrate de chaux pouvait, comme la pierre de Bologne calcinée, luire dans l'obscurité après son exposition à la lumière; seulement, cette matière attirant l'humidité de l'air perdait promptement sa propriété; elle a été appelée phosphore de Baudoin. Homberg, à la fin du seizième siècle, en même temps qu'il montrait les propriétés du phosphore qui porte son nom, et qui est, comme on l'a vu, du chlorure de calcium, et au milieu des recherches qui l'ont conduit à

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 volum, t. 6, p. 269.

(2) *Journal de Schweigger*, t. 14, p. 134 (1815). — Becquerel, t. 6, p. 272.

(3) *Journal philosophique d'Edimbourg*, t. 1, p. 363. — *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 14, p. 289 (1820).

(4) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. 49, p. 337 et 346 (1832).

(5) Baudoin, *Phosphorus hermeticus, etc.*, *Philosoph. transact. Abrigd.*, t. 11, p. 368.

découvrir son pyrophore, étudiait la préparation du phosphore de Bologne et des propriétés qu'il présente.

Dufay donna une certaine impulsion aux recherches faites dans cette direction, en montrant qu'un très-grand nombre de pierres calcinées, de coquilles, de concrétions calcaires, etc., pouvaient donner des corps lumineux après leur exposition à la lumière (1); il vit que la propriété reconnue par Boyle à quelques diamants appartenait à presque tous, et surtout aux diamants jaunes et à un certain nombre de minéraux; il observa, comme on l'a déjà mentionné plus haut, que la faculté de phosphorescence par insolation était indépendante de la propriété que les minéraux possédaient de luire par élévation de température, en ce sens, qu'une calcination suffisante qui avait fait émettre au corps toute la lumière qu'il pouvait donner les rendait impropres à donner de nouveau le même effet; mais que ces minéraux étaient aussi phosphorescents par insolation qu'avant cette action (2). Enfin, il montra que des diamants exposés à la lumière dans des boîtes couvertes de différents verres colorés brillaient de même nuance et ne participaient nullement à la couleur du verre. On voit que les expériences de Dufay, quoiqu'en petit nombre, avaient été très-bien conduites et avaient touché aux points les plus intéressants de la phosphorescence par insolation.

Les expériences de Beccaria (3), professeur à Bologne, ont augmenté beaucoup la connaissance du nombre des matières qui jouissent de la faculté d'être lumineuses après l'insolation; il a reconnu que si l'on expose à la lumière un grand nombre de substances organiques convenablement desséchées ainsi que beaucoup de minéraux, à l'exception des métaux et des pierres brunes, et que l'observateur puisse les voir sans que ses yeux aient été influencés par les rayons lumineux extérieurs, ces matières deviennent visibles dans l'obscurité pendant un temps plus ou moins long après l'action préalable des rayons solaires.

Pour faire aisément ces recherches, Beccaria avait fait construire une sorte de loge portative en forme de tour « comme ceux des couvents de religieux, » dit l'auteur, à l'un des côtés de laquelle une ouverture pouvait

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences de Paris*, t. 48, p. 524 (1730).

(2) *Ibid.*, t. 53, p. 347 (1735).

(3) *De quam plurimis phosphoris, etc.*; Bologne, 1744. *De bononiensi Instituto atque Academia*, t. 2, 1re partie, p. 274 (1745); — t. 2, 2me partie, p. 136 (1746); — t. 2, 3e partie, p. 498. — *Mém. de l'Acad., collect. académique, partie étrangère*, t. 10, p. 197. — Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 163. — Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 1, p. 65.

permettre le passage de l'objet et son exposition à la lumière, sans que l'observateur cessât d'être dans l'obscurité.

A peu près à la même époque, Zanotti (1), secrétaire de l'Académie de Bologne, étudia l'action de rayons de différentes couleurs sur le phosphore de Bologne, et fit des expériences analogues à celles que Dufay avait entreprises à l'aide de diamants en les éclairant au moyen de verres différemment colorés ; seulement il opéra avec un spectre solaire. Il reconnut, comme Dufay, que le phosphore de Bologne émettait une lueur dont la couleur était indépendante de celle des rayons incidents. Zanotti paraît être le premier qui se soit servi des rayons du spectre dans des expériences de ce genre.

Margraff (2), dont on a cité plus haut les recherches sur la préparation du phosphore de Bologne, a fait une étude chimique de ce composé, et a montré que le minéral nommé pierre de Bologne était un sulfate qui lors de sa calcination avec le charbon se changeait en sulfure. Il observa que ce sulfure, formé en vase clos, n'était pas lumineux après l'insolation, comme celui qui était obtenu par la calcination dans le fourneau en présence de l'air.

Comparant la composition de la pierre de Bologne avec celle des sélénites ou sulfates de chaux, il calcina ces sulfates avec du charbon, comme la pierre de Bologne, et obtint du sulfure de calcium phosphorescent, et cela que la calcination eût eu lieu à l'air libre ou en vase clos. Bien plus, il prépara artificiellement du sulfate de chaux, le mélangea avec du charbon et obtint des matières phosphorescentes; il remarqua même que, suivant l'espèce de pierre employée pour préparer le sulfate de chaux, il avait des matières phosphorescentes rouges ou blanches. Ces effets, comme on le verra dans le livre VI, pouvaient dépendre du plus ou moins de calcaire que renfermaient ces pierres, ainsi que de leur état moléculaire particulier.

Le travail de Margraff est le travail chimique le plus intéressant qui ait été fait dans le siècle dernier sur les matières phosphorescentes par insolation; ce chimiste avait indiqué la véritable voie à suivre dans cette étude. Depuis, les recherches ont été faites plutôt au point de vue physique pour connaître les propriétés lumineuses des corps phosphores-

(1) *De bononiensi Instituto, etc...* t. 1, p. 181 (1748).

(2) Margraff, *Opuscules chimiques*, 13me dissertation, édition française de 1762, t. 1, p. 383.

cents, qu'au point de vue chimique pour déterminer la composition de ces corps.

Canton, en 1764 (1), fit connaître une substance phosphorescente qui est plus facile à préparer que la pierre de Bologne; aussi cette matière a-t-elle porté le nom de phosphore de Canton, et a-t-elle servi à un grand nombre de recherches. Il suffit pour la préparer de calciner préalablement des écailles d'huître dans un creuset, puis de les pulvériser, de mélanger la poudre avec 1/4 de son poids de soufre, et de chauffer le mélange jusqu'au rouge pendant une heure. On a alors une substance qui exposée à la lumière est visible dans l'obscurité. C'est, comme on le verra plus tard, livre VI, du sulfure de calcium, qui peut être lumineux vert ou jaune suivant sa préparation.

Canton montra que la lumière d'une bougie, celle de la lune, ou les étincelles électriques pouvaient rendre sensible cette substance. Il fit voir que cette matière étant chauffée dans l'obscurité ne devient lumineuse par la chaleur que si elle a été préalablement exposée à l'action de la lumière, et que si on la chauffe immédiatement après l'impression lumineuse, l'action est plus vive qu'en élevant sa température plusieurs jours après. La chaleur donne donc lieu, dans un temps plus court, à l'émission de la lumière que le corps aurait donnée plus lentement à la température ordinaire.

Canton a cité en outre ce résultat intéressant, que si au bout de plusieurs mois la matière, préalablement insolée, a été chauffée avec de l'eau bouillante, elle ne produit rien; chauffée alors vers 500°, elle devient lumineuse pour retomber inactive jusqu'à ce qu'une nouvelle insolation se reproduise. Ainsi l'émission lumineuse, qui n'avait pas lieu par une faible élévation de température, est produite par un effet calorifique plus énergique; il faut donc supposer, comme nous le verrons plus tard, que la lumière imprime au corps, non pas seulement une modification tempo-

(1) *Méthode facile de faire un phosphore, etc.*, par Canton (voir *Journal de physique*, 1771, t. 1, p. 124). Je possède un échantillon de phosphore de Canton, lumineux vert, préparé par Canton lui-même. Ce phosphore est dans un petit ballon scellé à la lampe sur lequel se trouve gravée la date du 24 décembre 1764; et comme Canton, dans la première expérience rapportée dans son mémoire, dit qu'il a exposé à la lumière son phosphore placé dans des ballons scellés, à partir du 25 décembre 1764, il est très-probable qu'il avait préparé ses ballons la veille, le 24 décembre, et que celui que je possède est un de ceux qui ont servi à ces recherches. Voilà plus d'un siècle qu'il est préparé, et il est aussi lumineux qu'on peut l'obtenir par le procédé qu'il indique; il n'a donc été nullement altéré. Cet échantillon m'a été fort obligeamment donné par M. Wheatstone.

raire et pouvant se perdre à la température ordinaire, mais une modification permanente et ne se détruisant qu'à l'aide d'une température plus élevée.

Dessaignes et Placidus Heinrich en 1809, comme on l'a vu précédemment, ont observé le même effet à l'aide des décharges électriques.

Wilson (1) publia quelques années après un mémoire ayant pour titre : « Sur les phosphores et les couleurs prismatiques qu'ils présentent. »

Son travail, comme il le dit lui-même, n'est qu'une continuation des recherches de Beccaria ; il n'a pas étendu le nombre des matières phosphorescentes connues, mais il a fait plusieurs expériences intéressantes surtout en employant les écailles d'huître calcinées. Il a remarqué que les coquilles calcinées pouvaient présenter sur la même surface des lamelles de différentes nuances, les unes rouges, les autres jaunes, d'autres vertes ou bleuâtres ; dès lors il fit calciner ces coquilles avec des composés métalliques, mais sans obtenir aucun effet en rapport avec ce qu'il cherchait. Il se borna donc à séparer sur les mêmes coquilles les parties qui luisaient différemment, de façon à avoir des matières qui étaient soit rouges, soit jaunes, soit vertes, mais sans connaître le motif des différences observées.

On a vu précédemment que Dufay et Zanotti avaient montré que la couleur de la lumière émise ne dépendait pas de la teinte des rayons actifs, puisque le phosphore de Bologne et le diamant luisaient avec leur teinte propre sous l'action des rayons de diverses couleurs. Beccaria avait un moment prétendu le contraire, mais il n'avait pas suffisamment étudié la question. Wilson opéra avec la lumière décomposée par le prisme, et examina l'effet du spectre sur les coquilles qui brillaient par phosphorescence avec différentes nuances. Il vérifia que chaque coquille ne donne que la lumière qui lui est propre, quelle que soit la couleur du rayon qui l'excite ; ainsi les fragments lumineux rouges émettent une lumière rouge dans l'obscurité tout aussi bien quand ils ont été placés dans le violet que dans le bleu ou le rouge du spectre ; de même les fragments lumineux verts sont phosphorescents verts après l'action des rayons violets, bleus ou rouges. Il confirma donc les expériences de Dufay et de Zanotti, lesquelles montrent qu'il y a indépendance complète entre la couleur des rayons actifs et la couleur de la lumière émise par les matières phosphorescentes.

(1) *Journal de physique*, t. 8, p. 72 (1776). — Id., t. 15, p. 92 (1780).

Bien que cette conclusion soit exacte, ces physiciens ont opéré évidemment avec un spectre mal épuré et qui contenait de la lumière blanche. Ils ont bien observé que les rayons violets et bleus agissaient plus vivement que les rouges ; mais, comme nous le verrons plus loin, les rayons rouges ne donnent pas d'illumination sur le phosphore de Canton et ne produisent qu'une destruction d'effet.

Wilson montra qu'il n'y avait aucun rapport entre la durée de la lumière émise et l'intensité de celle-ci ; car du spath fluor faiblement lumineux peut conserver pendant longtemps sa lumière, tandis que d'autres corps qui brillent davantage s'éteignent plus vite. Pour prouver qu'il faut un temps très-court pour qu'un corps soit impressionné, il employa les décharges électriques, qui donnent, même aux coquilles, une phosphorescence plus vive que la lumière solaire.

Il a indiqué comme conséquence des effets observés que même sous l'influence de la lumière extérieure les corps phosphorescents sont lumineux avec les nuances qui leur sont propres, et que si on ne distingue pas les lueurs phosphorescentes quand ils sont exposés au jour, cela tient à l'intensité de la lumière extérieure, qui efface complétement la lumière qu'ils peuvent émettre.

Dans le travail de Wilson se trouvent énoncées des idées théoriques qui ne sauraient être admises, et dont il n'est pas nécessaire de parler. Ce qu'il importe de connaître, ce sont les faits bien constatés : c'est ainsi que les autres travaux relatifs à la phosphorescence ont été rapidement analysés seulement sous le point de vue expérimental.

On doit mentionner encore parmi les recherches faites à la fin du siècle dernier celles de Michel de Grosser (1) sur le diamant; il plaça des diamants impressionnables dans différents rayons du spectre solaire, et montra, comme les physiciens qui viennent d'être cités, l'indépendance qui existe entre la teinte de la lumière émise et celle des rayons actifs. Il a également rendu lumineux les diamants au moyen de l'étincelle électrique, et a observé que des diamants inactifs calcinés seuls, ou entourés de charbons, n'avaient acquis aucune vertu phosphorique, mais que calcinés dans du borax fondu ils étaient devenus lumineux par insolation après leur refroidissement. Il a répété, dit-il, cette expérience avec trois diamants. Est-ce la surface seule qui a été modifiée? C'est une étude qui n'a pas été faite. On verra plus tard, livre VI, comment la chaleur peut agir pour modifier les propriétés phosphorescentes des corps.

(1) *Journal de physique*, t. 20, p. 270 (1782).

En 1800, William Herschell (1) découvrit que les rayons les moins réfrangibles du spectre lumineux, les rayons rouges, donnent une élévation de température plus grande que les rayons bleus, et même qu'en dehors du rouge, dans la partie invisible du spectre moins déviée que le rouge, le thermomètre indique encore une élévation de température. Cette observation de l'action sur le thermomètre de rayons calorifiques invisibles appela l'attention de plusieurs physiciens, qui cherchaient à s'assurer si des effets de même ordre n'auraient pas lieu de l'autre côté du spectre, en dehors du violet, soit sur les substances phosphorescentes, soit sur les matières chimiquement impressionnables.

Ritter à Iéna (2), Inglefield (3) et Wollaston (4) à Londres, s'occupèrent de cette question; Inglefield, après avoir observé, comme les physiciens cités plus haut, que les rayons bleus et violets étaient plus efficaces que les rayons rouges pour exciter le phosphore de Canton, émit l'opinion que les effets de phosphorescence devaient se prolonger au delà du violet de même que les effets chimiques de la lumière sur le chlorure d'argent, car ce dernier corps, d'après l'observation de Schèele en 1777 (5), noircissait à la lumière de préférence dans les rayons violets; mais il ne fit pas l'expérience. Ritter, sur l'annonce de la publication d'Inglefield, fit connaître les résultats qu'ils avait obtenus, prouvant l'action chimique de rayons invisibles situés au delà du violet, et doit être considéré comme ayant le premier réalisé l'expérience. Il ne s'occupa pas de la phosphorescence, mais seulement des actions chimiques exercées sur les sels d'argent et sur le phosphore.

Wollaston, dans une note annexée au mémoire cité plus haut sur les pouvoirs réfringents, mémoire dans lequel il annonçait l'existence de raies noires dans le spectre lumineux, dit qu'il avait observé, comme Ritter, que l'action chimique exercée par la lumière sur le chlorure d'argent se prolonge en dehors du violet visible.

Un fait très-curieux relativement aux effets produits par la lumière sur les corps phosphorescents, et que l'on doit signaler à propos de l'action des rayons différemment réfrangibles, se trouve rapporté dans l'ouvrage

(1) *Philosophical transact.*, t. 90 (1800).

(2) *Ann. de Gilbert*, t. 12, p. 409 (Mém. de 1801 à 1802), publié en 1803. — *Journal de physique*, t. 57, p. 409 (1803).

(3) *Ann. de Gilbert*, t. 12, p. 408; mémoire publié en 1803.

(4) *Philosophical transactions*, t. 92 (1802).

(5) *Traité de l'air et du feu*; traduct. française (1781), § 66, p. 145.

sur les couleurs dû à Gœthe (1); ce fait résulte d'expériences de Seebeck et de Gœthe, qui, à ma connaissance, n'ont été publiées que dans cet ouvrage. Je traduis textuellement les deux paragraphes 678 et 679 de l'ouvrage de Gœthe :

« Le phosphore de Bologne devient lumineux sous l'influence des « verres bleus et violets, et jamais sous les verres jaunes et orangés; « on peut remarquer que le phosphore rendu lumineux par l'action des « couleurs bleues et violettes s'éteint plus vite dans les rayons jaunes « et orangés que s'il a été placé simplement dans une chambre obscure; « or, si on répète ces expériences au moyen du spectre prismatique, « on arrive toujours aux mêmes résultats. »

Les physiciens qui avant Herschel et Wollaston avaient opéré sur le spectre s'étaient évidemment servis d'un spectre mal épuré; ce n'est que depuis les recherches de ces physiciens que la division des rayons de diverse refrangibilité a été mieux effectuée. On verra plus tard quels sont les travaux faits en 1815 par Fraünhoffer sur le spectre lumineux ainsi que la découverte qu'il a faite d'un grand nombre de raies noires qui s'y rencontrent, et combien de nos jours on a été loin dans cette étude.

Quelques auteurs dont on a parlé plus haut se sont occupés de la phosphorescence par insolation. Parmi les résultats observés par Dessaignes (2), on peut citer ce fait que le verre ordinaire devient phospho-

(1) *Goëthe zur farbenlehre,* 3e chapitre, 55, § 678 et 679. — *Œuvre scientifique de Gœthe,* par E. Faivre, 1862, p. 211.

En 1842 lorsque je présentai à l'Académie des sciences un de mes premiers mémoires sur la phosphorescence par insolation, je montrai de quelle manière les rayons du spectre agissaient sur les surfaces phosphorescentes, et j'observai l'action destructive produite par les rayons jaunes et rouges. Je n'avais nullement connaissance de l'observation de Seebeck, qui n'était consignée que dans l'ouvrage de Gœthe, et à la séance où je fis la présentation de mon travail, Arago mentionna les résultats indiqués plus haut (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences de Paris,* t. 14, p. 903, 1842). Depuis, j'ai étudié ce sujet à diverses reprises, et j'ai montré que les rayons les moins réfrangibles ne détruisaient pas l'effet de phosphorescence aussi simplement qu'on l'avait supposé; dans les premiers moments de l'action des rayons rouges, orangés et jaunes, les sulfures phosphorescents brillent d'abord, puis toute lumière cesse. Il est probable que cette partie du rayonnement qui détruit la phosphorescence la détruit à la manière de la chaleur. Comme les corps phosphorescents ne sont capables que de rendre une certaine somme de lumière après leur exposition au rayonnement, les rayons les moins réfrangibles donneraient lieu, d'après cela, à une émission rapide de lumière, et quand les substances auraient émis toute la lumière qu'ils pourraient produire, ils cesseraient de luire. On verra, du reste, que les rayons rouges et jaunes peuvent donner lieu à des effets différents quand ils agissent sur d'autres corps que sur les sulfures phosphorescents. (*Ann. de chim. et de physique,* 3e série, t. 22, p. 244, 1848, et t. 55, p. 5, 1858.)

(2) *Journal de physique,* t. 69, p. 5, et t. 71.

rescent à la lumière, seulement après avoir été porté à la température rouge; ce corps perd ensuite peu à peu son pouvoir de phosphorescence et le reprend après une nouvelle calcination. Il est arrivé à des résultats intéressants en faisant usage de la lumière électrique, effets dont il a été question à l'occasion de la phosphorescence par élévation de température.

Grotthus (1), qui, de même que Dessaignes, a attribué aux phénomènes de phosphorescence une origine électrique, a fait plusieurs séries d'expériences curieuses, et a confirmé les recherches de Dufay, de Zanotti et de Wilson, d'après lesquelles une substance phosphorescente n'émet jamais une lumière de même couleur que celle qui agit sur elle, à moins que cette dernière ne soit de même couleur que celle émise naturellement par la substance quand elle devient phosphorescente.

En 1839, mon père (2) s'est occupé de l'action des décharges électriques pour provoquer la phosphorescence, et a démontré que les décharges n'agissaient que par les rayons qu'elles émettaient, et non pas par un effet électrique spécial, car les effets pouvaient être produits à des distances plus ou moins grandes. Il a prouvé que des écrans transparents et incolores agissaient très-inégalement sur les corps phosphorescents, les rayons actifs étant absorbés dans d'autres proportions que les rayons qui excitent la rétine. Conjointement avec M. Biot (3), il a signalé des faits très-intéressants se rapportant à la même question ainsi qu'à la transmission de l'action de phosphorescence autour d'un point primitivement impressionné au milieu d'une surface pouvant devenir phosphorescente.

Je terminerai ici l'exposé historique sommaire des principales recherches relatives à la phosphorescence. Je n'ai pas cité tous les travaux publiés, mais j'ai parlé de ceux qui ont conduit aux faits les plus importants et les mieux établis. Depuis près d'une trentaine d'années, je me suis livré à une série de recherches sur la phosphorescence et principalement sur la phosphorescence par insolation (4); ces recherches faisant

(1) *Journal de Schweigger*, t. 14, p. 134 (1815). — Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 6, p. 272.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 8, pages 183, 216, 272; *Traité d'électricité*, t. 4, p. 284.

(3) *Comptes rendus*, t. 8, p. 223. — *Archives du Muséum d'histoire naturelle*, nouv. série, t. 1, p. 215 (1839).

(4) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 8, p. 493. — *Archives du Muséum*, t. 1, p. 215. — *Comptes rendus*, t. 14, p. 901. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 40, p. 341, 1842. —

presque entièrement le sujet de plusieurs chapitres de la première partie de cet ouvrage, ce serait un double emploi de les résumer ici; je n'en parlerai que dans les livres suivants.

*Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 257 (1843). — *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 22, p. 244 (1848). — *Id.*, t. 55, p. 5 (1858). — *Comptes rendus*, t. 47, p. 105 (1858). — *Id.*, tome 48, p. 404 (1859). — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 55, p. 40 (1859). — *Id.*, t. 62, p. 5 (1861). — *Société chimique de Paris*, leçon faite en 1861.

# LIVRE II.

## EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR LES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

## CHAPITRE PREMIER.

### Effets lumineux produits par le frottement et par la percussion.

Toute cause qui imprime aux molécules des corps un mouvement vibratoire dont la vitesse acquiert une grandeur suffisante est une cause productrice de lumière; parmi elles, on peut distinguer les actions mécaniques et physiques comme le frottement, le choc, le clivage, la cristallisation, qui peuvent donner lieu aussi à un dégagement de chaleur.

Quand on frotte un grand nombre de corps les uns contre les autres ou avec un corps dur, on observe des lueurs plus ou moins vives. Les corps qui présentent ces effets sont en général des minéraux ou des matières fondues comme le verre ; les métaux ne donnent aucun effet (1). Ainsi lorsqu'on frotte deux cristaux de quartz dans l'obscurité, on aperçoit des étincelles de couleur rouge.

On sait que le choc du briquet contre un morceau de silex donne dans l'air des étincelles dues à la combustion des parcelles de fer détachées et échauffées par l'action du frottement. Cet effet n'a pas lieu dans le vide ; mais en expérimentant dans l'obscurité, on voit, d'après Hawksbée (2), une traînée lumineuse pâle et faible sur le tranchant du silex

(1) Dufay, *Mémoires de l'Acad. des sciences de Paris*, t. 53, p. 347 (1735). — Dessaignes, *Journal de physique*, t. 69, page 20. — Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 volume, t. 4, p. 48, et *Traité de physique*, t. 2, p. 129.

(2) Hawksbée, *Physico-mecanical experiment* (1709).

frotté par l'acier. Il se produit probablement dans cette circonstance un phénomène de phosphorescence par frottement.

Si l'on imprime un mouvement rapide de rotation, dans le vide, à une roue en verre, et qu'on appuie avec force sur la circonférence un tube de verre qui frotte sur la roue, il se manifeste une lueur assez intense dont la couleur est d'un rouge de feu. Il en est de même en opérant dans l'air ou dans l'eau, mais avec moins d'intensité. On peut obtenir également des effets analogues en frottant dans le vide, contre le verre, des corps comme la chaux carbonatée, les coquilles d'huître, etc.

Dans la dolomie, la propriété phosphorique par frottement est bien développée : il suffit de la frotter avec un corps dur pour apercevoir une traînée lumineuse rouge, propriété qui dépend de la texture plutôt que de la dureté de la matière, car il y a des dolomies très-dures qui en sont privées, tandis que d'autres, plus tendres, la possèdent à un haut degré; nous citerons par exemple celle du Saint-Gothard.

Un très-grand nombre de minéraux, de pierres précieuses comme le diamant, les path fluor, la chaux phosphatée, etc., jouissent de cette propriété. Quand on frotte certains diamants sur une étoffe de laine ou sur un corps dur, ils paraissent entourés d'une lueur; on a vu dans l'historique, livre I^er^, que ce phénomène paraissait avoir été observé avec le diamant par Boyle en 1663; il a été étudié attentivement par Dufay (1). Ce physicien a montré que la lueur émise n'est pas dépendante de l'électricité dégagée par frottement, car il y a des diamants qui sont lumineux et non électriques, et d'autres qui s'électrisent par frottement et ne produisent pas de lumière; ainsi il a fait voir qu'un diamant rendu électrique par frottement, ayant été mouillé, avait perdu son action électrique mais avait conservé sa lueur phosphorescente.

Il a encore reconnu des différences très-considérables suivant les échantillons soumis à l'expérience. De tous les diamants jaunes que Dufay a essayés un seul fut médiocrement lumineux; tous présentaient le phénomène au même degré, ainsi que la propriété d'être lumineux après l'insolation, comme on le verra plus tard. Un gros diamant fleur de pêcher émettait une vive lumière dès le premier frottement, et cependant il était moins électrique que les jaunes; un diamant vert produisit un effet contraire, c'est-à-dire que, bien qu'il fût électrique, il était difficilement lumineux par frottement. Un gros diamant bleu,

(1) Voir *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 53 (1735).

rempli de glaces, n'était pas sensiblement phosphorescent; comme il était électrique, il émettait une petite étincelle en approchant le doigt; un diamant couleur améthyste se comporta de même.

La lumière, l'électricité, la chaleur ne sont que des manifestations diverses d'effets moléculaires; par conséquent peu importerait que les effets lumineux, électriques, calorifiques existassent simultanément ou apparussent successivement; seulement ces résultats indiquent que ces phénomènes peuvent se manifester indépendemment les uns des autres. Il y a des circonstances où l'origine électrique de la lumière produite dans le frottement est évidente; mais dans la plupart des cas cités plus haut l'effet lumineux peut être considéré comme dû à une action moléculaire engendrée par le frottement lui-même.

On peut encore citer les effets produits par des minéraux à base de chaux : ainsi le spath fluor à surface grenue est phosphorescent par le frottement, tandis que celui qui est compacte l'est moins; la chaux phosphatée de l'Esdramadure est également lumineuse.

Th. de Saussure a montré que le marbre blanc ou de couleur, c'est-à-dire le calcaire compacte, calciné au rouge avec l'acide phosphorique, n'est point phosphorescent par frottement, tandis que cette propriété est développée dans la craie qui a subi la même préparation; le frottement d'une plume suffit alors pour produire la phosphorescence sous l'apparence de traits lumineux. Cette propriété se manifeste encore quand on enlève la couche vitreuse formée à la surface.

Dans les différentes circonstances ci-dessus indiquées, la couleur de la lumière émise par frottement dépend de la nature des matières; avec le quartz et la dolomie, comme on l'a vu, la lumière émise est rouge; avec la craie, les calcaires, la chaux phosphatée, elle est jaune; avec deux fragments de porcelaine frottés l'un contre l'autre, elle a également cette dernière teinte.

Les minéraux qui sont phosphorescents par l'action du frottement peuvent présenter des actions analogues sous l'influence de la chaleur et de la lumière; mais les phénomènes produits sont complétement indépendants les uns des autres. Ainsi, le quartz, qui est très-lumineux par le frottement, l'est bien moins par l'action de la chaleur et très-faiblement sous l'influence de la lumière, comme on le verra plus tard; le diamant, le spath fluor, sont au contraire lumineux par ces trois modes d'action. D'un autre côté, cette indépendance est rendue manifeste par le fait, qui sera établi plus loin, que la phosphorescence par

la chaleur peut toujours être détruite dans un corps par l'action d'une température suffisamment élevée et prolongée, tandis que l'action de la lumière rend toujours lumineux un corps phosphorescent par insolation, soit que ce corps n'ait pas été échauffé, soit qu'il ait subi l'influence préalable de la chaleur.

# CHAPITRE II.

## Effets lumineux produits par le clivage et la cristallisation.

### § 1. *Clivage.*

Lorsqu'on clive dans l'obscurité une lame de mica, on aperçoit une faible lueur; mais comme chaque lame séparée manifeste chacune des deux électricités, on peut supposer que l'effet produit a une origine électrique. Cependant, les effets que produisent certaines matières fondues ainsi que ceux que l'on observe lors de la cristallisation de plusieurs substances ne paraissent pas avoir cette origine, et sont des exemples d'actions lumineuses produites lors de changements brusques dans l'état moléculaire des corps. Ainsi on a observé que l'acide borique fondu dans un creuset de platine se fendille au moment du refroidissement en répandant quelquefois une lueur qui suit la direction des fentes.

Quand on broie dans un mortier certaines variétés de feldspath, ou bien lorsqu'on frappe à coups redoublés la variété adulaire qui se clive avec facilité, il se produit de la lumière dans le sens des fissures; d'autres matières, comme le sucre, donnent lieu à des effets du même genre. L'une de celles qui produit les effets peut-être les plus marqués est le nitrate d'urane cristallisé, quand les cristaux sont suffisamment secs; en cassant chaque cristal dans l'obscurité, on voit une lueur qui l'illumine en entier; Il suffit même d'agiter dans l'obscurité le flacon qui contient les cristaux pour voir apparaître des lueurs dans toutes les parties du nitrate, car le choc des cristaux les uns contre les autres suffit pour produire la rupture d'un grand nombre d'entre eux.

Le chlorure de calcium produit des effets qui sont également remarquables et qui ont été découverts par Homberg, en 1693, comme on l'a vu dans le livre Ier. Lorsque ce sel est fondu dans son eau de cristallisation (1), si l'on transporte le creuset dans une chambre noire et qu'on le laisse refroidir graduellement, non-seulement la lumière phosphorescente persiste pendant plusieurs minutes, mais on voit distinctement des corruscations accompagnées d'un craquement, dû probablement à la contraction soudaine de la masse ou à la cristallisation. On produit également le phénomène en plongeant une baguette de verre dans la solution, dont une partie se concrète autour de la baguette et qu'on peut ensuite enlever. Quand le creuset est refroidi et la phosphorescence disparue, on obtient de très-belles étincelles en rayant simplement le chlorure avec un instrument aigu, ou en le frappant avec un marteau. On obtient encore des lueurs phosphoriques en broyant la substance dans un mortier.

La couleur des étincelles paraît varier avec le degré d'ébranlement communiqué à la masse; si l'on raye doucement, on a de faibles étincelles qui deviennent jaunes en rayant plus fortement; un petit coup frappé avec un marteau donne une étincelle de couleur orangée.

Il faut que le chlorure soit nouvellement fondu pour présenter cet effet; mais tous les chlorures ne le produisent point. Il est possible que des conditions non encore spécifiées et analogues à celles que H. Rose a indiquées pour les sulfates, et dont il va être question plus loin, soient nécessaires et que peut-être la présence du fer, comme l'indiquerait quelques expériences de Th. Saussure (2) donne au chlorure cette propriété; c'est ce que des recherches nouvelles pourraient indiquer.

### § 2. *Cristallisation.*

La cristallisation d'un certain nombre de sels donne lieu, au sein même du dissolvant, à une émission de lumière qui est d'autant plus curieuse qu'elle se produit au moment même de la formation de chaque cristal; ce sont comme de petites étincelles qui marquent la place où se dépose chacun d'entre eux et à certains moments; quand cette formation est rapide, on voit le vase entièrement illuminé. Berzélius a cité

(1) Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 136. — Id., *Traité d'électricité*, t. 6, p. 281.
(2) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 6, p. 269.

des effets de ce genre dans la cristallisation du fluorure de sodium, ainsi que dans celle des sulfates de soude et de potasse.

Henri Rose a donné des exemples fort curieux d'effets de cette nature dans des circonstances telles qu'on peut les reproduire à volonté : il a montré que lors de la cristallisation de l'acide arsénieux, dans certaines conditions, il y avait une vive émission de lumière (1). Si l'on prend 2 parties d'acide arsénieux vitreux, 45 d'acide chlorhydrique ordinaire et 15 d'eau, que l'on porte le tout à l'ébullition dans un ballon pendant dix à quinze minutes et qu'on laisse refroidir la dissolution aussi lentement que possible en diminuant graduellement la flamme du gaz qui sert à l'échauffer, si le ballon est placé dans l'obscurité, la cristallisation est accompagnée d'une vive lumière et la formation de chaque petit cristal est marquée par une étincelle. Si l'on agite le vase, un grand nombre de petits cristaux se forment tout à coup, et en même temps il se produit beaucoup d'étincelles. Ce phénomène dure pendant tout le temps qu'il y a des cristaux à déposer, et quelquefois la dissolution refroidie est lumineuse le second jour après l'expérience.

Quand les cristaux ont été déposés, si on les retire, qu'on les sèche sur du papier, en les pressant ou en les frottant, ils deviennent phosphorescents. C'est un exemple d'effets de phosphorescences par actions mécaniques que l'on doit ajouter à ceux qui ont été cités plus haut, à moins que dans ce cas il ne se produise un effet lumineux par clivage comme avec le nitrate d'urane.

D'autres acides que l'acide chlorhydrique peuvent produire également le même phénomène, mais en proportion de la quantité de matière dissoute; les acides acétique et nitrique ainsi que l'acide sulfurique, qui ne dissolvent qu'une très-petite quantité d'acide arsénieux, ne donnent que de très-faibles apparences lumineuses; l'acide chlorhydrique, au contraire, dissolvant une assez forte proportion de ce corps se trouve dans les conditions les plus convenables pour présenter ces effets. En traitant une certaine masse d'acide arsénieux transparent avec de l'eau régale ne renfermant pas un excès d'acide chlorhydrique et en quantité suffisante pour ne pas le dissoudre complétement et le transformer en acide arsénique, on observe encore une forte émission de lumière.

En examinant les cristaux déposés, H. Rose a reconnu qu'ils constituaient de l'acide arsénieux opaque, au lieu d'être à l'état vitreux comme

(1) *Ann. de chimie et de physique,* 2e série, t. 61, p. 288 (1836).

celui qui avait été dissous. On sait en effet que l'acide arsénieux affecte deux états physiques différents : originairement par la fusion, il est transparent, puis il devient peu à peu opaque. A ces deux états correspondent des densités différentes et des solubilités diverses dans l'eau. Ce serait donc à un changement d'état moléculaire produit lors de la cristallisation que serait dû la production de lumière. Pour vérifier d'une autre manière cette explication, H. Rose a répété la même expérience avec l'acide arsénieux opaque, et il n'a obtenu aucun effet, si ce n'est dans des circonstances où celui-ci contenait encore de l'acide à l'état vitreux.

On a dit plus haut que des effets analogues avaient été observés par Berzélius lors de la cristallisation du sulfate de potasse; mais ces effets avaient été remarqués accidentellement sans qu'on ait pu les reproduire avec certitude; H. Rose a indiqué les conditions nécessaires pour les observer à volonté (1). En opérant avec le sulfate de potasse pur, récemment fondu ou cristallisé, et en le dissolvant dans l'eau, on n'obtient aucun effet de lumière par cristallisation. Mais si l'on fond dans un creuset de platine un mélange composé d'un équivalent de sulfate de potasse et d'un équivalent de sulfate de soude, on a une masse vitreuse qui en se refroidissant n'offre aucune trace de cristallisation. Cette masse étant dissoute dans l'eau bouillante, et la liqueur filtrée aussi rapidement que possible, la dissolution abandonnée à un refroidissement lent donne dans l'obscurité les mêmes apparences que la dissolution d'acide arsénieux vitreux : la formation de chaque petit cristal est accompagnée d'une étincelle.

Les cristaux que l'on obtient ainsi étant dissous de nouveau ne présentent plus aucun effet lumineux. Ces cristaux, qui se sont formés avec production de lumière, étant retirés de la dissolution, deviennent encore phosphorescents quand on les frotte ou même quand on les presse un peu fortement. Au bout de quelques heures, ils ne présentent plus de phosphorescence à la friction. Les cristaux d'acide arsénieux qui se sont déposés d'une solution chaude d'acide arsénieux vitreux conservent plus longtemps la propriété d'être lumineux par friction que les cristaux de sulfate.

Pour observer ces effets il faut que la masse vienne d'être récemment fondue; sans cela, il n'y a aucun effet lumineux. Du reste dans les expériences où l'on n'aperçoit pas de lumière, le sel déposé présente un

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 3, p. 251 (1841).

autre aspect que lorsqu'il y a phosphorescence pendant la cristallisation ; dans ce dernier cas, on n'observe pas de sulfate de soude hydraté mélangé au sulfate de potasse.

H. Rose a reconnu que les cristaux qui sont déposés avec phosphorescence ne sont pas formés de sulfate de potasse pur, et qu'ils renferment une notable proportion de sulfate de soude à l'état anhydre : c'est donc un véritable sel double. Quand il ne se dépose que du sulfate de potasse pur, on n'obtient aucun effet lumineux. Ainsi le phénomène de phosphorescence paraît tenir dans ce cas à ce qu'un sulfate double de potasse et de soude, et non pas de sulfate de potasse pur, à l'état vitreux après la fusion, se dissout en conservant le même état et passe à l'état cristallisé au moment seul où il se sépare de la liqueur. H. Rose pense que le sulfate de soude dans ce cas passerait à une modification isomère dans laquelle il serait isomorphe avec le sulfate de potasse, ce qui n'a point lieu ordinairement quand il est anhydre. La phosphorescence proviendrait donc, comme pour l'acide arsénieux, d'un changement dans l'état physique, c'est-à-dire du passage d'un état à un autre état isomérique.

H. Rose a constaté que le sulfate double de potasse et de soude pouvait se produire dans d'autres circonstances ; ainsi en fondant ensemble du sulfate de potasse et du chlorure de sodium, on a une masse qui donne plus régulièrement une lumière phosphorescente par cristallisation. On atteint le même but en fondant ensemble du sulfate de potasse et du carbonate de soude, ou bien des équivalents égaux de chromate neutre de potasse et de sulfate de soude anhydre.

Les sels dans lesquels l'acide sulfurique est remplacé par les acides isomorphes, l'acide chromique et l'acide sélénique, conduisent à des résultats du même genre : ainsi on obtient encore une émission lumineuse très-vive au moment de la cristallisation après avoir dissous dans l'eau bouillante jusqu'à saturation du bichromate de potasse et du carbonate de soude, ou du séléniate de potasse et du sulfate de soude, à équivalents égaux.

# LIVRE III.

## EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR LA CHALEUR.

## CHAPITRE PREMIER.

### Phosphorescence par l'action de la chaleur.

§ 1. *Phénomènes généraux. — Substances impressionnables diverses.*

Quand on élève la température de certaines substances, elles commencent à émettre de la lumière dans l'obscurité à une température bien inférieure à la température rouge, où tous les corps deviennent lumineux par incandescence ; quelques-uns, comme certains diamants ainsi que des spath fluors colorés, présentent même une émission de lumière à une température qui n'atteint pas 100° ; on dit alors que ces substances sont phosphorescentes par l'action de la chaleur.

On a vu dans le livre Ier quels ont été les résultats principaux des recherches faites sur ce sujet ; il est donc inutile de revenir sur l'historique de la question ; il faut examiner comment les effets lumineux se manifestent dans les différentes circonstances des expériences.

Pour observer la phosphorescence par élévation de température, particulièrement dans les corps qui ne sont doués qu'à un faible degré de cette propriété, il faut se placer dans une obscurité profonde et de manière à déterminer la température à laquelle on opère. On peut se servir d'un canon de pistolet fermé à la culasse par une vis ; le canon est maintenu un peu obliquement par un support et la culasse est placée dans un petit fourneau dont on modère le feu ; quelquefois, on l'échauffe à l'aide d'un bec de gaz ou encore en plongeant la culasse dans un bain d'alliage, dans de l'huile ou dans un milieu dont on connaît

la température. A la bouche du canon de pistolet se trouve une planche en bois percée d'une ouverture au travers de laquelle passe l'extrémité du canon; cette planche est destinée à garantir l'observateur de la lumière du foyer et à ne lui laisser parvenir que celle qui est émise dans l'intérieur du canon en fer. On projette alors les matières à essayer dans le canon; on place une petite lame de verre sur l'ouverture pour empêcher, lors de la décrépitation, les fragments placés dans l'intérieur d'atteindre l'œil de l'observateur, et on examine les effets produits. Il est nécessaire que l'observateur reste longtemps dans l'obscurité avant d'expérimenter, afin de rendre sa rétine plus impressionnable aux rayons lumineux.

Quelquefois une disposition plus simple suffit pour les observations, surtout quand on n'opère pas dans des bains à température fixe : on se place dans une chambre obscure, et l'on se sert d'un creuset épais en platine ou en argent, que l'on échauffe avec un bec de gaz, à une température un peu inférieure au rouge, en l'inclinant légèrement; on projette alors dans ce creuset la substance sur laquelle on opère après l'avoir réduite en fragments; on éteint le bec de gaz, et l'on examine les effets produits. Avec cette dernière disposition, la température du creuset baisse rapidement et l'on n'a pas des effets aussi réguliers qu'avec la disposition précédente. On peut néanmoins, à l'aide d'écrans, opérer en chauffant continuellement le fond du creuset.

Tous les corps phosphorescents par la chaleur manifestent leur propriété quand on les projette en poudre ou en fragments dans le creuset ou dans le tube de fer échauffé. En général la phosphorescence est plus vive mais de plus courte durée quand la matière est en poudre ou en petits fragments que lorsqu'elle est en plus grande masse; on s'en rend compte aisément en remarquant que l'élévation de la température est bien plus rapide dans le premier cas que dans le second; en effet, le changement moléculaire qui est cause de l'émission de lumière ne peut donner lieu qu'à une même somme d'effet, c'est-à-dire qu'à une même somme de lumière; si donc l'émission a lieu pendant un temps de courte durée, l'intensité lumineuse sera plus grande. On voit, d'après le même motif, que des corps qui sont faiblement lumineux par phosphorescence ne le paraissent sensiblement que lorsqu'ils sont en petits fragments ou en poudre et qu'ils sont projetés sur un support assez fortement échauffé.

Parmi les corps phosphorescents par la chaleur, le diamant et la chaux fluatée occupent le premier rang. Le diamant, à cause de son prix élevé,

n'a pas été soumis à des expériences aussi nombreuses que le spath fluor. Tous les diamants ne sont pas lumineux par élévation de température; mais il faut remarquer qu'un certain nombre d'entre eux ont déjà subi une calcination qui leur donne parfois plus de limpidité, mais qui leur a fait perdre leur propriété de phosphorescence par la chaleur; il est donc nécessaire d'opérer avec les diamants qui n'ont pas été soumis à l'action calorifique par les lapidaires.

Le spath fluor présente lors de sa phosphorescence un grand nombre de nuances et quelquefois une grande vivacité de lumière. Les variétés colorées de spath deviennent lumineuses soit lorsqu'on les projette sur du mercure bouillant, soit dans l'eau bouillante, soit sur une pelle de fer ou de cuivre chauffée au-dessous du rouge. Il existe une variété appelée chlorophane qui peut être phosphorescente à 25 ou 30°.

Les cristaux incolores et très-limpides ne sont pas en général lumineux, ou quand ils le sont, c'est à un très-faible degré; cependant, j'ai eu des échantillons de chaux fluatée blanche et limpide qui étaient assez fortement lumineux par élévation de température; il n'y a donc pas de règle générale à cet égard. Les fragments colorés en violet, en bleu, en vert, en jaune sont au contraire très-phosphorescents.

Si l'on place de la chaux fluatée violette dans un des appareils décrits plus haut, elle commence en général à émettre une lumière bleuâtre, qui tourne au rose puis au violet, au bleu et au bleu foncé, et la phosphorescence s'éteint; à cet instant, les fragments sont décolorés. Dans des essais que j'ai faits j'ai trouvé que la fluorine jaune avait présenté une émission de lumière violacée claire, qui a disparu peu à peu. La chaux fluatée verte émet souvent une nuance verte olive qui passe par l'orangé, soit aux nuances blanchâtres violacées, soit aux nuances bleues. Ainsi les effets lumineux sont modifiés d'une variété à une autre, et il n'y a aucun rapport entre la couleur de la lumière émise et la couleur propre de ces substances; en outre, toutes les variétés colorées qui ont été suffisamment chauffées, et qui ont cessé de luire, sont devenues incolores et ont perdu leur propriété de phosphorescence; quand on les échauffe de nouveau, elles ne présentent plus ce phénomène. Bien qu'elles aient perdu leur couleur en même temps que la faculté d'être lumineuses, cela ne veut pas dire que la coloration soit la cause du phénomène de phosphorescence. Ces deux causes sont complétement indépendantes l'une de l'autre; la couleur peut être perdue, et l'on verra plus loin que l'on peut rendre à la matière le pouvoir de deve-

nir de nouveau lumineuse. On doit donc conclure de ces effets que la chaleur agit en même temps et sur le corps pour changer l'état moléculaire qui produit le phénomène d'émission lumineuse, et sur la substance qui donne la couleur au corps ou bien sur la cause en vertu de laquelle cette coloration a lieu.

On voit d'après cela pour quel motif la phosphorescence par la chaleur ne peut être considérée comme un caractère spécifique d'une substance, puisque le même corps peut être phosphorescent ou être privé de cette propriété. Nous verrons qu'il peut en être autrement de la phosphorescence par insolation.

Un très-grand nombre de substances sont phosphorescentes par la chaleur, mais non pas au même degré que le spath fluor ; parmi elles on distingue les composés à bases alcalines et terreuses, comme les composés de chaux et notamment la craie ; ceux de strontiane, de baryte, les sels de soude et de potasse comme le sulfate de potasse, les chlorures de sodium et de mercure, l'acide arsénieux etc. Quant aux substances métalliques en général et aux métaux, ils ne le sont pas.

La leucophane (silicate de glucine et de chaux avec fluorure de sodium) est bien lumineuse et présente une lumière d'abord violacée, puis ensuite bleu clair et enfin rosée. La chaux phosphatée de l'Estramadure, en petits fragments, émet une lumière jaune clair qui disparaît assez promptement. La strontiane carbonatée donne une couleur orangée, et la baryte carbonatée est faiblement phosphorescente quand on en projette des fragments sur le support ou dans le creuset chauffé au rouge naissant.

La dolomie, dans les mêmes conditions ou même simplement projetée sur une pelle de fer chauffée au-dessous du rouge naissant, produit une belle lumière orangée; avec la craie, la couleur est jaune. Je me borne à citer ces exemples, mais dans les mémoires de Wedgwood, de Dessaignes, de Placidus Heinrich, de Brewster, cités dans l'Historique, page 23, on peut voir les résultats obtenus avec un grand nombre de minéraux.

Dans toutes les substances il se produit le même effet qu'avec le spath fluor, c'est-à-dire que si l'action de la chaleur a été suffisamment élevée et prolongée, la phosphorescence est détruite. On a vu dans le livre I^er^ que ce résultat avait été observé dès que l'on a étudié la phosphorescence avec quelque attention. On doit considérer ce phénomène comme provenant d'un changement moléculaire que la chaleur pro-

duit et qui une fois opéré dans les corps, à moins de circonstances spéciales, ne se rétablit pas de lui même.

Il y a ainsi une différence essentielle entre l'émission lumineuse produite de cette manière et celle que donne l'incandescence des corps, puisque tant que la température est supérieure à 500° et persiste, l'incandescence persiste, tandis que la phosphorescence est essentiellement passagère, et quand le changement moléculaire est opéré dans le corps, la température a beau être la même, l'émission lumineuse n'a plus lieu. Il paraît même qu'il faut que la température atteigne un certain degré dans chaque corps pour que la phosphorescence soit détruite tout à fait. On a vu livre Ier, page 28, que Canton avait observé qu'au bout de quelques jours le sulfure de calcium échauffé à 100° n'émettait plus de lumière, mais que chauffé plut haut il devenait lumineux pour s'éteindre ensuite. Il est possible que pour les minéraux il en soit demême, et que si on les maintenait à une température de 100 ou 200°, ils aient cessé de luire entre ces limites, mais qu'au delà ils puissent encore émettre de la lumière. En général pour les différents minéraux, c'est vers le rouge naissant que tout effet de phosphorescence est détruit quand l'élévation de température a une durée suffisante.

On voit, d'après ce qui précède, qu'il ne peut y avoir aucun rapport entre la longueur d'onde des rayons lumineux émis et la température communiquée au corps, comme on en observe dans l'incandescence; cela ressort des résultats cités plus haut à propos du spath fluor, puisqu'il n'y a aucun rapport de réfrangibilité dans la succession des couleurs des lumières émises, et que ces couleurs peuvent être émises par l'action de températures bien différentes.

Beaucoup de corps combustibles et de composés organiques sont phosphorescents par l'action de la chaleur; on peut citer entre autres la houille, la tourbe, la plombagine, le jayet, le soufre, et parmi les substances végétales les fécules, le papier, etc.; parmi les substances animales les os, les dents, les coquilles, le corail, etc.; la température cependant ne doit pas être assez élevée pour carboniser ces substances. Parmi les liquides on peut citer les huiles essentielles comme l'essence de térébenthine, l'essence de citron, l'huile de pétrole, qui deviennent phosphorescentes à la température de l'ébullition; mais en général les liquides dont on peut élever la température jusqu'à l'ébullition sans les décomposer, comme l'eau, l'alcool, les acides, ne manifestent aucune émission lumineuse. Je mentionnerai encore le sulfate

de quinine, qui chauffé à une douce chaleur devient lumineux (1).

Il est possible qu'avec les premiers corps un effet du même genre que celui qui se produit dans les minéraux donne lieu à l'émission lumineuse; mais dans le cas du soufre, des huiles essentielles, la combustion lente de ces corps ou bien certaines réactions chimiques n'interviennent-elles pas?

Si l'on examine ce qui se passe avec le soufre, on reconnaît que ce corps peut produire de la lumière dans diverses conditions ; lorsque sa combustion a lieu à une haute température, la lumière émise est un peu plus blanche que vers 500°; mais si l'on projette dans l'obscurité du soufre en poudre sur une pelle de fer chauffée au-dessous du rouge, et à une température suffisante seulement pour le volatiliser, on voit une lumière faible et fugitive qui accompagne la volatilisation de la matière. En plaçant un corps froid au-dessus du support échauffé, on recueille du soufre sublimé. Cette lueur provient-elle d'une combustion lente ou bien d'un mouvement moléculaire? C'est ce qu'on n'a pas établi, car on n'a pas répété la même expérience hors du contact de l'oxygène et sans prouver qu'il ne se produisait pas d'acide sulfureux.

En général un corps combustible placé sur une plaque de cuivre et chauffé au point de ne pas entrer en ignition, commence, avant de brûler, par émettre une lueur très-faible, qui a toutes les apparences d'une lueur phosphorique; on voit cet effet se produire non-seulement dans l'air, mais encore dans le vide ou dans un milieu rempli de gaz acide carbonique; l'antimoine, le graphite, l'ambre , le maïs répandent dans ces diverses conditions une faible lueur.

On a observé également que l'huile d'olive placée dans un tube et chauffée suffisamment pour brûler sans mèche s'éteint aussitôt qu'elle est plongée dans de l'acide carbonique, mais continue à émettre une faible lueur.

Ainsi, bien que des composés organiques présentent des phénomènes de phosphorescence par l'action de la chaleur, cependant certains effets observés pourraient se rapporter à des actions chimiques du genre de celle qui a lieu lors de la combustion lente du phosphore.

On a vu que la phosphorescence des minéraux par l'action de la chaleur était un phénomène essentiellement temporaire, dû à un changement moléculaire produit dans la substance, et que quand le corps avait

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 19, p. 111.

subi l'action d'une température suffisamment élevée et prolongée, il avait perdu cette propriété. Est-ce une espèce de clivage moléculaire qui produit cette action? La chaleur spécifique, la densité sont-elles changées? Ce sont des questions qui n'ont pas été résolues. Du reste il est possible que les changements opérés soient assez faibles pour ne pouvoir pas être mesurés par les procédés ordinaires d'expérimentation (1). Mais si une élévation suffisante de température détruit le pouvoir phosphorescent d'un corps pour la chaleur, ce corps peut néanmoins devenir lumineux par frottement et par l'action du rayonnement lumineux comme si la calcination n'avait pas eu lieu.

Une élévation de température suffisamment prolongée détruisant toute phosphorescence par la chaleur, on peut concevoir que les substances minérales d'origine ignée n'en sont pas douées, et que l'on doit plutôt retrouver cette propriété dans les composés d'origine aqueuse. Si cette supposition est fondée, on doit en conclure que le diamant, qui est un minéral phosphorescent par élévation de température, doit avoir une origine aqueuse et non pas une origine ignée.

Les exemples suivants viennent à l'appui de cette hypothèse : on prend du spath fluor bien transparent et qui, chauffé préalablement, a perdu toute phosphorescence par élévation de température, et on le fait dissoudre dans de l'acide chlorhydrique; en laissant refroidir très-lentement le liquide, on obtient des cristaux de spath fluor qui sont doués d'une légère phosphorescence. Ainsi la matière qui en était privée redevient douée de cette propriété quand elle a été préalablement dissoute. Le fait a été observé par M. Pearseal (2), et je l'ai vérifié même en mettant dans la dissolution $\frac{1}{100}$ de protochlorure ou de perchlorure de fer. L'introduction de ces substances n'a produit aucun effet appréciable.

D'après Dessaignes, certains sels alcalins et terreux comme le chlorure de sodium et le sulfate de potasse, qui conservent leur acide sous l'action de la chaleur, perdent cependant leur phosphorescence par l'effet de la calcination; dans ce cas ils abandonnent une partie de leur eau de combinaison ou de l'eau d'interposition; si on les expose pen-

(1) M. Regnault, dans son second mémoire sur les chaleurs spécifiques (*Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 1), a déterminé la chaleur spécifique du spath fluor avant et après la calcination, et a trouvé dans ce dernier cas une valeur un peu plus forte. Mais une seule expérience a été faite et il serait nécessaire de varier les comparaisons de ce genre.

(2) *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 49, p. 358 (1832).

dant quelque temps à l'air pour qu'ils reprennent l'eau que la chaleur leur a enlevée, ils recouvrent la propriété lumineuse qu'ils avaient perdue.

Th. de Saussure (1) a pensé que la présence de sels étrangers pouvait communiquer la phosphorescence aux substances qui les renfermaient. Il a remarqué en effet que toutes les pierres calcaires douées de la phosphorescence par la chaleur, traitées convenablement par l'eau distillée, donnent des signes non équivoques de la présence des acides sulfuriques et chlorhydrique. Ce dernier acide lui a paru être une des causes de la phosphorescence de ces calcaires. Il a reconnu encore que la combinaison de la chaux avec l'acide chlorhydrique n'émet jamais de lumière sur un fer rouge quand les deux substances sont parfaitement pures. Si l'on fait dissoudre du spath d'Islande dans de l'acide chlorhydrique, la dissolution filtrée et évaporée donne un résidu non phosphorescent. Il en est de même de ce résidu quand il est porté au rouge jusqu'à vitrification. Si l'on projette dans ce résidu un fragment de carbonate de chaux, il y a effervescence sans lumière émise ; mais si le carbonate est chargé de protoxyde de fer, on aperçoit à la surface du mélange une très-belle phosphorescence. De même, le résidu de l'évaporation de la dissolution chlorhydrique faite avec un excès de carbonate chargé de protoxyde de fer donne toujours une très-belle phosphorescence à l'aide de la chaleur.

En étudiant la phosphorescence du spath fluor, il a émis l'opinion que la phosphorescence pourrait bien tenir à la présence du fer, et que les échantillons divers de cette matière fussent d'autant plus phosphoriques qu'ils contiendraient davantage de fer ou de manganèse à l'état de protoxyde. Le spath en effet en s'échauffant perd sa couleur en même temps que sa phosphorescence. Il est possible que la présence de matières étrangères influe sur la phosphorescence comme sur la coloration des corps, et, ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, sans qu'il y ait une dépendance nécessaire entre ces deux ordres d'effets, car la coloration ne paraît pas la cause unique du phénomène. D'un autre côté, les corps qui sont privés de phosphorescence peuvent l'acquérir de nouveau à l'aide d'actions physiques, comme on le verra plus loin, et en outre des spaths fluors non colorés peuvent être fortement phosphorescents, bien que cela soit rare. Du reste, si la présence d'oxydes métalliques comme les oxydes

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 6, p. 269.

de fer, de manganèse, de chrome, donnent aux minéraux des couleurs plus ou moins vives; toutes les circonstances de la coloration de ces minéraux ne sont pas encore bien connues, et il est possible que dans certains cas cette coloration soit due à un arrangement moléculaire analogue à celui qui est nécessaire pour produire la phosphorescence.

On doit encore observer que dans les corps phosphorescents par la chaleur l'intensité de la lumière émise doit dépendre de la rapidité avec laquelle l'échauffement a lieu, et que quand il s'agit de masses minérales un peu fortes, elles doivent présenter des lueurs moins vives mais plus durables que les fragments de petite dimension, car une même masse ne peut émettre qu'une même quantité de lumière, mais seulement plus ou moins rapidement.

Quant à la composition de la lumière produite lors de la phosphorescence par la chaleur, elle n'a pas été l'objet d'une étude analogue à celle qui a été faite avec la lumière émise par phosphorescence après l'insolation et dont on parlera plus tard; en général, les lueurs phosphorescentes sont peu vives, et on n'aurait pu les observer par réfraction au travers d'un prisme en verre que dans des cas restreints. On peut seulement remarquer que lorsqu'on produit la phosphorescence par élévation de température, avec la plupart des échantillons de spath fluor, ou avec la leucophane, ce sont ordinairement les rayons les plus réfrangibles qui sont émis les derniers; ainsi les couleurs qui sont aperçues les premières sont les couleurs vertes et orangées, et celles qui sont observés à la fin de l'expérience sont bleues ou violacées; mais il n'y a aucune règle fixe à cet égard.

### § 2. *Influence de la lumière sur le pouvoir de phosphorescence par l'action de la chaleur. Action temporaire; action permanente.*

On a vu précédemment que les corps phosphorescents par la chaleur pouvaient perdre cette propriété après avoir été soumis à une élévation de température suffisamment élevée et prolongée; il faut examiner s'ils peuvent ensuite l'acquérir de nouveau.

Les effets observés avec les corps que l'on appelle phosphores artificiels mettent en évidence l'influence exercée par l'agent lumineux, bien que cette influence soit en partie temporaire, et montrent comment des effets physiques peuvent modifier ces corps et les rendre phosphorescents par l'action de la chaleur. Si l'on se sert d'un des sulfures de

calcium, de barium ou de strontium qui seront décrits dans le livre VI, et qu'après leur exposition à l'action des rayons les plus réfrangibles ou simplement à la lumière diffuse, on les rentre dans l'obscurité, ces matières deviennent lumineuses, et peu de temps après la lumière émise devient de plus en plus faible et même inappréciable à nos organes en raison de sa faible intensité; mais la modification que ces substances ont reçue du rayonnement n'est pas encore détruite, et une élévation de température dans l'obscurité les rend de nouveau lumineuses. La lumière qu'elles émettent ainsi, par élévation de température, est de courte durée; peu d'instants après les substances redeviennent obscures, et pour que la chaleur donne lieu à une nouvelle émission de lumière il est nécessaire qu'elles soient de nouveau exposées au rayonnement solaire.

Quand ces substances ont été exposées à la lumière et sont placées dans une obscurité profonde pendant quelque temps, trois ou quatre jours, elles perdent presque entièrement la faculté de luire immédiatement par élévation de température; mais une nouvelle insolation les rend de nouveau phosphorescentes par la chaleur. Ainsi la modification acquise par l'action du rayonnement ne se conserve en partie que pendant un certain temps dans les corps phosphorescents, puis finit par disparaître. Cet effet se produit que les corps soient renfermés ou non, pourvu qu'ils soient à l'obscurité.

Il semble d'après cela que les corps soumis à l'action de la lumière n'aient la faculté d'émettre qu'une certaine somme de vibrations lumineuses due à la modification qu'ils ont reçue de la part du rayonnement : s'ils restent dans l'obscurité, la lumière est émise lentement et pendant un temps assez long, en diminuant graduellement d'intensité ; si on les échauffe, l'élévation de température fait émettre rapidement aux corps toute la quantité de lumière qu'ils sont capables d'émettre, et cet effet ayant lieu dans un temps de courte durée, la lueur émise est assez intense.

On voit par là que la modification produite par la lumière, pour rendre phosphorescents par la chaleur les sulfures alclino-terreux, paraît temporaire. Elle le serait uniquement si après un séjour de quelque temps dans l'obscurité les sulfures alcalino-terreux projetés dans un creuset chauffé à 450° restaient obscurs; mais on trouve toujours une très-légère émission de lumière. On a vu, page 28, que Canton avait observé cet effet avec des coquilles calcinées ; j'ai pris des précautions

pour que les matières insolées, puis rentrées dans l'obscurité, restassent à l'abri de toute action lumineuse comme celle d'une allumette enflammée ou d'une lampe à alcool, et au bout de quinze jours j'ai toujours obtenu, par élévation de température, quelques traces de lumière au moment de la projection de la matière dans un creuset chauffé à 500°. Cette intensité lumineuse est très-faible, il est vrai, et montre que la plus grande partie de la modification produite par l'insolation sur les sulfures alcalino-terreux est temporaire; elle prouve en outre que la matière a reçu également une faible modification permanente qui la rend alors phosphorescente par la chaleur comme le spath fluor naturel, mais à un plus faible degré.

La lumière produit une action semblable sur les minéraux phosphorescents; mais comme la persistance des effets lumineux sous l'influence du rayonnement est moindre, c'est-à-dire que ces corps s'éteignent plus vite quand ils sont rentrés dans l'obscurité après avoir été insolés, l'effet temporaire est moins appréciable et l'action permanente plus marquée. J'ai cherché à demontrer ce fait en employant deux substances : la leucophane, et la variété de spath fluor nommée chlorophane. La leucophane, comme on le sait, qui est un silicate de glucine et de chaux contenant du fluorure de sodium, est très-phosphorescente par la chaleur; projetée dans un creuset à 500°, elle donne une vive lumière, qui d'abord violacée passe ensuite au bleu clair puis redevient violette et dure pendant quelque temps; ensuite elle perd sa propriété de phosphorescence par la chaleur. Mais si on l'expose pendant quelques instants aux rayons solaires directs ou bien aux rayons qui ayant traversé un verre bleu foncé sont concentrés au foyer d'une lentille, en la projetant dans le creuset chauffé, elle luit de nouveau pendant peu de temps puis redevient inactive à moins de l'exposer encore à la lumière. Bien plus, si après son exposition à la lumière on la laisse dans l'obscurité pendant plusieurs jours, l'effet produit par la chaleur est toujours le même. Ainsi, dans ce cas la lumière donne à la matière une modification permanente.

J'ai disposé des cloches en verre à double enveloppe afin de mettre entre les parois de ces cloches des liquides colorés qui ne laissent passer que des portions déterminées du rayonnement solaire, et de façon à ce que les corps placés à l'intérieur ne reçoivent que de la lumière ainsi tamisée par les écrans colorés. L'une d'elles contenait une dissolution saturée de bichromate de potasse, et l'autre une dissolution ammonia-

cale de sulfate de cuivre; la première dissolution ne laissait passer que la partie la moins réfrangible du spectre solaire; la deuxième le bleu et le violet. J'ai mis sous ces cloches des échantillons de leucophane et de chlorophane, les uns calcinés, et par conséquent non phosphorescents par la chaleur, les autres ayant été préalablement soumis à l'action des décharges électriques qui leur avait donné, comme on le verra plus loin, la propriété de phosphorescence par la chaleur. La leucophane inactive exposée aux rayons solaires sous l'une et l'autre cloche a acquis la propriété d'être lumineuse par élévation de température avec la teinte violacée bleuâtre indiquée plus haut, mais sous la cloche bleue l'action a été un peu plus vive. Une exposition de plusieurs jours n'a pas augmenté l'effet. Il s'est produit dans ce cas une modification permanente, car cette matière, maintenue dans l'obscurité après l'action préalable de la lumière, a présenté le même effet.

Il est probable d'après cela que la durée de l'insolation au delà d'une certaine limite n'augmente pas l'action exercée, mais que celle-ci peut devenir plus forte quand l'intensité de l'action excitatrice devient plus grande, car en soumettant ces mêmes échantillons à l'action des rayons solaires concentrés au foyer d'une lentille ou à l'influence des décharges électriques excitées très-près de la surface, l'effet produit est plus énergique.

Avec la chlorophane on observe les mêmes effets sous la cloche bleue, mais aucune action sous la cloche orangée. On verra dans le livre VI que les rayons les moins réfrangibles qui peuvent rendre la leucophane phosphorescente sont à peu près inactifs sur le fluorure de calcium.

Quant aux divers échantillons de leucophane et de chlorophane qui avaient reçu préalablement une modification permanente au moyen des décharges électriques, et dont les uns étaient restés pendant un mois à l'obscurité et les autres exposés pendant le même temps à l'action des rayons solaires sous les cloches, ils ont présenté sensiblement la même action par élévation de température. Ainsi la modification permanente qu'ils avaient reçue n'a été détruite ni changée pendant ce temps, soit à l'obscurité, soit sous l'action des rayons solaires orangés ou bleus, autant du moins qu'il a été possible d'en juger, car on ne peut pas estimer la quantité de lumière émise par les différents échantillons.

On doit rapporter à la même cause, à une action produite par la lumière, la modification permanente que Dessaignes et Placidus Heinrich ont observée (voir page 24) comme étant communiquée à quelques corps

tels que le spath fluor, le diamant et la chaux phosphatée, au moyen de décharges électriques excitées très-près de ces substances.

Pour soumettre ces corps à l'action des décharges électriques, on les place sur la tablette d'un excitateur universel quand ils sont en fragments, ou dans des tubes quand ils sont en poussière, de manière à ce que les extrémités des conducteurs soient à deux ou trois centimètres de distance. On fait ensuite passer de l'une à l'autre tige une ou plusieurs décharges d'une batterie électrique. On trouve alors que non-seulement les corps dont on vient de parler sont phosphorescents après le passage de la décharge, et ainsi qu'on le verra plus tard, mais encore qu'en élevant la température de ces minéraux ils sont devenus phosphorescents par la chaleur même si avant d'être soumis à l'action de la décharge ils avaient été calcinés pendant longtemps de façon à être privés de tout effet de phosphorescence par élévation de température. La lumière électrique agit donc comme la lumière solaire, mais avec une plus grande énergie en raison de sa grande intensité, et elle est capable de faire acquérir la phosphorescence à des corps qui ne la possédaient pas auparavant ; il n'est pas même besoin, immédiatement après l'action de la décharge, d'élever la température du spath fluor ou du diamant exposé à l'action de l'électricité pour observer cet effet ; l'élévation de température peut n'avoir lieu qu'au bout de quelque temps et même plusieurs mois après.

M. Pearseal (1), qui s'est occupé de cette question, a observé un fait curieux : quelquefois les minéraux soumis à l'action de la décharge prennent une teinte bleuâtre ou violacée, surtout si avant leur calcination ces matières avaient eu une certaine couleur qui avait été détruite par la première calcination. La lumière de l'étincelle électrique en outre du pouvoir de phosphorescence rendrait donc à des minéraux décolorés une certaine coloration, mais qui ne serait pas en général celle qu'ils avaient avant de devenir incolores.

Ces expériences ont été répétées depuis, et je les ai même variées dans ces derniers temps en employant pour donner des décharges entre les tiges de l'excitateur un appareil d'induction de Ruhmkorf dans le circuit extérieur duquel était placé une forte jarre. A la chlorophane, au diamant, à la chaux phosphatée, j'ai ajouté la leucophane qui est également impressionnable à la lumière solaire, comme on l'a vu plus haut, et qui ne prend aucune coloration manifeste. L'étincelle électrique n'agit donc

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 49, p. 337 et 346 (1832).

que par sa lumière, mais son action est plus vive que celle des rayons solaires, en raison de sa grande intensité lumineuse et de sa proximité des corps.

On savait que la lumière pouvait produire des effets analogues sur des verres, et M. Faraday a vu, par exemple, que le verre teint en violet par le manganèse se colore davantage quand il est exposé aux rayons solaires (1). M. Pélouze a observé également que du verre préparé avec des sulfates de soude et contenant probablement du fer, se colore en jaune à la lumière solaire et se décolore par la chaleur. Il pense que l'action est due à la présence de composés à base de soufre, car avec du verre préparé à l'aide de carbonates alcalins exempts de sulfates, on n'observe aucune action semblable (2). Nous reviendrons sur ce sujet dans la seconde partie de cet ouvrage en traitant des actions chimiques produites par la lumière.

On a dit plus haut que la coloration naturelle de certaines substances comme le diamant et le spath fluor paraissaient indépendantes du phénomène de phosphorescence. On observe bien en effet que les spaths fluors colorés sont plus phosphorescents par élévation de température que ceux qui sont incolores, mais j'en ai eu à ma disposition qui étaient incolores et très-limpides, dont les uns n'étaient pas phosphorescents et d'autres, surtout un, qui l'étaient presque aussi vivement que la chlorophane. D'un autre côté, tous les spaths fluors électrisés deviennent phosphorescents, mais tous ne se colorent pas, comme M. Pearseal l'a observé, quand l'étincelle passe très-près de leur surface. Les spaths primitivement colorés, surtout ceux de teinte violette, prennent une légère coloration violacée par l'action des décharges, d'autres, blancs, n'en prennent pas. J'ai vu un morceau de spath fluor blanc très-limpide se colorer légèrement en violet après deux heures de décharges électriques ; comme il en passait au moins deux par seconde, il a dû se produire environ 7200 décharges par heure. Après avoir été calciné deux fois, de nouvelles décharges ont à peine changé sa couleur, et il est resté blanc, mais chaque fois il était très-phosphorescent par la chaleur, et cela d'une manière permanente. Des diamants ont présenté aussi parfois une teinte bleue très-pâle, mais la leucophane n'a pas changé de couleur. Ainsi la cause qui donne lieu à la coloration des minéraux peut être chimique ou physique, et elle peut être produite par la lumière,

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 25, p. 99.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 64 (séance du 14 janvier 1867).

mais elle est indépendante du phénomène de phosphorescence par élévation de température.

Quand on opère comme on vient de le dire à l'aide de décharges électriques se succédant à des intervalles de temps très-courts, on peut constater, comme avec la lumière solaire, qu'au bout de peu de temps l'effet produit est à son maximum, et en continuant l'excitation on n'augmente plus l'action particulière permanente communiquée au corps et en vertu de laquelle il donne de la lumière par élévation de température. Ainsi cette action est donnée aux corps par une intensité lumineuse déterminée agissant pendant un temps, en général assez court, après lequel l'effet n'augmente plus, et en outre cette action est en rapport avec l'intensité de la lumière excitatrice. On reviendra plus tard sur ce sujet dans le livre VI.

Il résulte encore de cette étude que le phénomène de phosphorescence dépend bien de la nature du corps impressionnable, mais que l'intensité comme la composition de la lumière émise tient à son arrangement moléculaire sans que l'on puisse indiquer les motifs des différences que l'on observe; en outre, la substance peut présenter cette action ou en être tout à fait privée, et une fois inactive on peut lui donner le pouvoir d'être de nouveau lumineuse par élévation de température.

### § 3. *Combustion lente. Phosphore.*

On a déjà parlé du phosphore dans le livre Ier, et l'on a vu que la lueur qu'il émet à la température ordinaire, dans l'air, avait vivement attiré l'attention, et de là la dénomination sous laquelle il est connu. La lumière qu'il émet ainsi dans l'air, quand il est à l'obscurité, est due à une combustion lente, et comme elle exige l'action de la chaleur, on a rapproché ces phénomènes de ceux dont il est question dans ce livre. Quand on examine le phosphore à la lumière, il donne des vapeurs blanches d'acide hypophosphorique qui ont une odeur particulière, presque alliacée; ce sont elles qui sont lumineuses dans l'obscurité.

Les recherches faites par les chimistes qui se sont occupés de ce corps ont montré que l'oxygène était nécessaire pour la production du phénomène, et que hors de l'influence de ce gaz on n'observait pas d'effet de lumière, ceux qui avaient été obtenus dans différents milieux provenant de la présence d'une petite quantité d'oxygène. Mais pour que cette réaction puisse se produire, il faut des circonstances particulières

de température et de pression qui sont à signaler : Quand, à la température ordinaire, au-dessous de 27°,5 le phosphore se trouve dans le gaz oxygène, il ne luit pas et le gaz n'est pas absorbé, comme l'ont montré à la fin du siècle dernier Fourcroy et Vauquelin (1); mais au-dessus de cette température il commence à luire en même temps que la combinaison s'opère, et si la température s'élève, l'inflammation vive peut arriver. En abaissant la température au-dessous de 27°,5 le phosphore redevient obscur et inactif.

Si à une température inférieure à 27°, on vient à diminuer la pression du gaz oxygène, alors aussitôt la combustion lente a lieu. On explique ainsi pourquoi elle se produit dans l'air, la présence de l'azote dans l'atmosphère équivalant à une diminution de pression de l'oxygène des $\frac{4}{5}$ de sa valeur. Un autre gaz que l'azote mêlé à l'oxygène donne lieu au même effet.

Il est intéressant de signaler ce fait que la température nécessaire pour l'inflammation ou la combustion vive du phosphore est d'autant plus basse que la pression de l'oxygène est moindre ; ainsi Van Marum a reconnu (2), que dans l'air raréfié sous la machine pneumatique, du phosphore placé sur du coton s'enflamme spontanément quand la pression n'est plus que de quelques centimètres de mercure.

Si la combustion lente du phosphore donne de la lumière, on ne doit pas en conclure que toute action chimique analogue doive en donner ; il se produit au moment de la réaction chimique un phénomène tout spécial dépendant de la nature de la matière, de même que dans la cristallisation de tous les sels il ne se manifeste pas toujours de la lumière, et ce n'est, comme on l'a vu, que dans des cas particuliers comme avec l'acide arsénieux, les doubles sulfates de potasse et de soude etc., que des effets lumineux peuvent se produire. Cependant, dans des corps organisés, ainsi qu'on le verra dans le livre VII, des effets du même ordre peuvent avoir lieu, alors que des composés carbonés s'unissent à l'oxygène à basse température.

Dans le second paragraphe, on a dit que dans certaines circonstances le soufre, ainsi que des huiles essentielles avaient manifesté des effets de lumière ; il est possible que dans ces conditions ces effets soient dus à des actions chimiques s'exerçant à une température inférieure à celle où les combustions vives se manifestent ; mais ces effets n'ont pas encore

(1) *Ann. de chim.*, t. XXI, p. 189; 1796.
(2) *Id.*, t. XXI, p. 158.

été suffisamment étudiés pour que l'on soit fixé sur la cause de la lumière qui se produit alors.

On doit peut-être rapporter à des effets de combustion lente du phosphore les apparences lumineuses qui, sous le nom de feux follets, ont apparu dans des conditions où de l'hydrogène phosphoré avait pu prendre naissance, comme près des cimetières.

Quand on soumet à l'analyse prismatique la lumière émise dans la combustion lente du phosphore, l'observation de l'image prismatique est très-peu distincte et ne présente aucun caractère bien tranché ; on ne voit qu'une traînée lumineuse sans apparence de parties noires ou brillantes, c'est-à-dire sans raies. Lors de la combustion vive on observe des raies brillantes dont il sera question dans le livre 4.

### § 4. *Incandescence phosphorique.*

On peut rapprocher des phénomènes de phosphorescence par élévation de température ceux qui se manifestent avec certaines substances, naturelles ou artificielles, qui étant chauffées à une température convenable dégagent tout à coup une grande quantité de chaleur et de lumière, effets qui sont accompagnés d'un changement remarquable dans les propriétés physiques des corps. Tel est le cas d'un certain nombre d'oxydes métalliques, comme l'oxyde de chrome, la zircone, l'acide titanique, l'acide tantalique, des acides du niobium, etc... Ce phénomène est différent du phénomène de phosphorescence par la chaleur, qui vient d'être étudié plus haut, et si dans la plupart des cas des effets calorifiques ont lieu dans des changements isomériques, comme lors de la transformation du soufre mou en soufre ordinaire et dans des cas semblables (1), et qu'une diminution subite de la capacité calorifique qui instantanément donne lieu à une certaine quantité de chaleur auparavant latente (2) paraisse rendre compte de l'incandescence subite de ces matières, cependant il est des cas où ce dégagement de chaleur n'est pas sensiblement appréciable. C'est pour ce motif que j'ai compris ces effets sous la dénomination d'effets d'incandescence phosphorique pour distinguer cette incandescence temporaire de celle qui se produit dans les conditions ordinaires.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. LV, p. 123; 1859.
(2) Regnault, *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 188.

H. Rose (1) a cité à ce sujet les exemples présentés par la gadolinite et la samarskite (niobate de fer, d'urane et d'yttria). La gadolinite présente le phénomène d'incandescence d'une manière très-marquée quand on élève sa température à un degré convenable; l'élévation subite de la température est facile à manifester. Après l'action, la densité de la matière est devenue plus grande et la chaleur spécifique a diminué, comme cela résultait de l'hypothèse précédente. M. Rose a trouvé que la capacité calorifique, qui était 0,142 avant l'incandescence, était devenue 0,132; elle avait donc diminué de $\frac{7}{100}$ de sa valeur.

Avec la samarskite il se produit également un dégagement de lumière à un moment déterminé; mais il n'y a pas à cet instant de chaleur dégagée d'une manière notable. La chaleur spécifique de la matière diminue bien comme avec la substance précédente, mais moins, car avant l'action elle était 0,107 et elle est devenue 0,102, c'est-à-dire qu'elle a diminué de $\frac{5}{100}$; mais la densité au lieu de devenir plus grande a diminué de valeur. La matière s'est donc dilatée pendant l'émission lumineuse au lieu de se contracter. H. Rose pense, d'après cela, que l'incandescence de ce minéral paraît plutôt analogue au dégagement de lumière qui a lieu lors de la transformation de l'acide arsénieux vitreux en acide arsénieux opaque, lequel se produit sans dégagement de chaleur et avec diminution de densité, au lieu d'être analogue à celle d'une émission lumineuse par élévation subite de température. C'est ce que des expériences ultérieures pourront décider.

On pourrait peut-être ranger dans cette classe de faits une observation de M. Brewster d'après laquelle l'anatase quand on l'échauffe graduellement présente tout à coup une émission de lumière d'une vive intensité et de peu de durée.

On voit donc que si lors de la cristallisation, comme on l'a rapporté précédemment, il peut se manifester tout à coup une émission de lumière indiquant un changement isomérique de certaines substances, des effets du même genre peuvent se produire à un moment donné par élévation de température, et qu'il est possible que ces effets ne soient pas toujours dus à une émission subite de chaleur qui élèverait le corps à l'incandescence.

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 55, p. 125.

# CHAPITRE II.

## Incandescence, irradiation.

---

§ 1. *Effets généraux; pyromètre employé dans l'étude de l'irradiation.*

Lorsqu'on élève graduellement la température d'un corps, en même temps qu'il s'échauffe il rayonne de tous côtés de la chaleur; tant que la température n'atteint pas un certain degré, il reste obscur et agit seulement comme source calorifique. Mais il arrive une certaine limite à partir de laquelle ce corps agit comme source de lumière; l'intensité de la lumière qu'il émet alors est d'autant plus vive que sa température est plus élevée. On admet généralement que les corps commencent à devenir lumineux à partir de la même limite et que cette limite est voisine de 500° centigrades; ils donnent à cet instant une faible lumière de teinte rouge sombre bien connue. En élevant davantage la température, non-seulement l'intensité de la lumière augmente, mais encore cette lumière peut renfermer des rayons de plus en plus réfrangibles, de sorte qu'à une température qui ne dépasse pas beaucoup celle de la fusion de l'or, la lumière émise est sensiblement blanche, et donne des rayons compris entre les limites de réfrangibilité des raies obscures A et H qui terminent les deux extrémités visibles du spectre solaire.

Lorsque l'incandescence d'un corps solide opaque, tel que le platine ou la chaux, se produit, il faut examiner quels sont les effets lumineux qui se manifestent à mesure que la température s'élève et varie par degrés déterminés. Puisque ce corps incandescent émet à un instant donné des rayons de toute longueur d'onde, mais que les plus réfrangibles ne dépassent pas une certaine limite de réfrangibilité dépendant du degré de température, il faut donc examiner :

1° Si les différents corps commencent à émettre de la lumière par irradiation à la même température;

2° Comment augmente l'intensité de la lumière émise par un même corps à mesure que la température croît, non-seulement pour chaque rayon d'une réfrangibilité déterminée, mais encore pour la totalité des rayons émis;

3° Comment augmente la réfrangibilité des rayons les plus réfrangibles émis à une température déterminée à mesure que cette température s'élève.

Les questions relatives à l'intensité lumineuse peuvent être abordées facilement, surtout en ce qui concerne les rayons d'une même couleur, car leur comparaison peut être faite à l'aide des appareils dont il sera question plus loin; mais celles qui sont relatives à la réfragibilité n'ont pas été étudiées jusqu'ici d'une manière complète.

Avant de parler des résultats des observations faites sur ce sujet, il est nécessaire d'indiquer quels sont les procédés pyrométriques dont on peut faire usage.

Dans des recherches sur l'irradiation (1), après avoir comparé les températures à l'aide de diverses méthodes, je me suis arrêté à l'emploi des courants thermo-électriques, car il est nécessaire de connaître à chaque instant, et cela tres-rapidement, quelle est la température du corps incandescent sur lequel on opère; en outre, ce procedé a l'avantage de permettre d'étudier l'intensité lumineuse de la portion des métaux qui forment le couple thermo-électrique lui-même, en même temps que l'on évalue l'intensité du courant électrique développé, lequel peut servir à faire connaître la température.

Les différentes conditions exigées pour un bon pyromètre thermo-électrique se trouvent remplies par un couple platine-palladium qui avait été proposé par mon père (2) en 1835 ; ce couple est formé par deux fils, l'un de platine, l'autre de palladium, de 2 mètres de longueur et de $0^{mm},8$ à 1 millimètre de diamètre environ, joints ensemble sans soudure par une de leurs extrémités en les pressant fortement sur 1 centimètre de longueur, et en les entourant, sur cette étendue, à l'aide d'un fil de platine d'un petit diamètre qui les tient serrés l'un contre l'autre.

Ce couple platine-palladium a une force électro-motrice peu différente d'un couple fer-platine pour une différence de température de 0° à 100° ; l'intensité du courant électrique développé est donc assez forte. En outre, cette intensité croît avec la température d'une manière assez régulière, comme on le verra plus loin, et ces deux métaux ne s'altèrent pas par l'action de la chaleur quand le couple est placé dans un tube en porcelaine ou dans une moufle. Cette dernière propriété est

(1) *Ann. du Conservatoire imp. des Arts et métiers*, t. IV, p. 597 ; 1863.

(2) *Compte rendu de l'Académie des sciences*, t. I, p. 28. Becquerel *Traité d'électricité*, 7 volumes, t. IV, p. 1.

précieuse, car j'ai pu me servir d'un couple de ce genre pendant plusieurs années, sans qu'il ait été altéré. Le fil de palladium seul a diminué un peu de diamètre, par suite peut-être d'une légère altération superficielle; mais lorsque je l'ai placé dans la flamme d'un bec de gaz alimenté avec de l'oxygène ou de l'air, la fraction du fil de palladium placée dans la flamme est devenue rapidement cassante.

On place les fils dans deux tubes concentriques en porcelaine A B, *a b* (fig. 1), ces tubes entrant l'un dans l'autre, et le tube extérieur A B étant

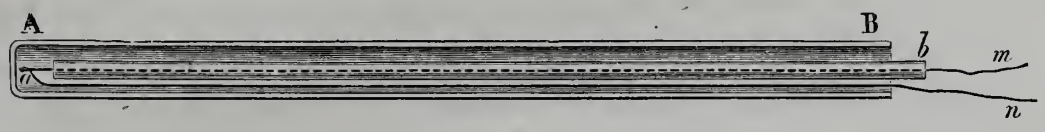



Fig. 1.

fermé en A; le fil de palladium *m* est dans l'axe du plus petit tube *a b*, et le fil de platine *n* entre les deux; la surface de jonction des deux fils est donc au fond du tube. Quant aux points de jonction de ces fils et des conducteurs du rhéomètre, ils sont maintenus constamment dans la glace fondante pendant la duré des observations, comme on l'indiquera plus loin dans la figure 2.

Pour mesurer l'intensité du courant, j'ai fait d'abord usage de la méthode par opposition ou par compensation dans un même circuit thermo-électrique, dont mon père a tiré un si grand parti pour la mesure des températures (1); mais la difficulté de faire varier la température entre des limites assez étendues pour ramener l'équilibre électrique dans le circuit m'a fait renoncer à ce mode d'expérimentation. J'ai préféré l'emploi d'un magnétomètre, formé par un fort barreau aimanté creux et mobile au milieu d'un cadre en cuivre de galvanomètre pour amortir les oscillations; ce barreau porte un miroir, et l'observateur placé à distance examine à l'aide d'une lunette l'image des divisions tracées sur une règle divisée fixée à la lunette. Ce procédé, comme on le sait, donne des déviations qui sont proportionnelles aux intensités des courants électriques; si, en outre, l'on a soin de prendre un circuit assez long pour que la résistance à la conductibilité des parties des fils de platine et de palladium portés à la température rouge ne représentent qu'une très-petite fraction de la résistance du circuit total, on peut négliger les variations qui proviennent de l'échauffement de ces fils, et

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXII; 1860.

les déviations observées donnent les forces électro-motrices comparées du couple thermo-électrique dans les différentes circonstances de température que l'on étudie. On pourait également se servir d'une boussole des sinus; c'est même avec un simple multiplicateur que ce pyromètre peut rendre dans les arts de très-bons services.

Il est évident que si l'intensité du courant thermo-électrique développé dans le couple platine-palladium croissait suivant une loi simple et parfaitement régulière, ce pyromètre serait peut-être le plus facile à employer parmi ceux dont on peut se servir pour l'évaluation des hautes températures. Mais bien que l'intensité du courant augmente assez régulièrement avec la température, cependant la loi suivant laquelle a lieu cet accroissement ne peut être exprimée d'une manière simple, et il faut le graduer par comparaison avec un thermomètre à air, ou bien en le rapportant à des points fixes bien déterminés.

J'ai d'abord comparé la marche de ce pyromètre thermo-électrique platine-palladium avec celle de thermomètres étalons, dont les indications ont été rapportées à celles du thermomètre à air. Les points fixes 100° et 358°,50 ont été obtenus dans la vapeur d'eau bouillante et dans le mercure bouillant, et même je dois dire que dans chaque série d'expériences j'avais soin de déterminer, à l'aide du magnétomètre, l'intensité du courant thermo-électrique correspondant à 100°, de façon à rapporter toutes les indications de cet appareil à celle que donne le couple placé dans la vapeur d'eau bouillante à 76 centimètres de pression. Cette précaution est nécessaire, car le circuit du magnétomètre change de résistance extérieure avec la température ainsi qu'avec l'intensité magnétique du barreau aimanté, de sorte que, suivant la température extérieure, à 100° la déviation du magnétomètre peut n'être pas toujours la même.

Une autre précaution doit être indiquée ici; comme les déviations du barreau aimanté ne doivent pas dépasser 3° ou 4°, on a soin de placer dans le circuit des bobines de résistance, de façon que dans le cours d'une même expérience ces déviations n'excèdent pas les limites des quantités que l'on peut observer directement avec la lunette du magnétomètre.

On reconnaît, d'après les résultats des expériences, que l'intensité du courant électrique augmente avec la température, mais plus rapidement que cette température elle-même, puisque le rapport R de l'intensité I du courant à la température T croît à mesure que T devient

plus grand. Cependant entre 300° et 400° il y a un ralentissement dans la manière dont varie ce rapport. A température égale du couple, ce rapport n'est pas le même dans chaque expérience, car l'intensité magnétique du barreau, ainsi que la conductibilité du circuit peut changer ; mais il reste le même pendant une même série de déterminations. On a rapporté, du reste, tous les résultats à la déviation donnée à la température de l'eau bouillante à $0^m,760$ de pression.

On reconnaît également que le rapport $\frac{R - R'}{T - T'}$ n'est point constant, et qu'il diminue depuis 0° jusqu'à 358°,50, de sorte qu'une formule empirique de la forme $I = AT + BT^2$, dans laquelle A et B sont deux coefficients constants, ne saurait lier la température T à l'intensité I du courant entre ces deux limites extrêmes des observations ; mais si la différence de température ne dépasse pas 50°, on peut prendre la formule précédente pour représenter les résultats, et les températures calculées ne diffèrent pas de $\frac{1}{2}$ degré des températures observées. Ce point est important à signaler, car on peut interpoler des valeurs entre les résultats des expériences, et l'on a ainsi des nombres qui ne diffèrent que fort peu de ceux que donneraient les observations. C'est ainsi qu'ont été obtenues les valeurs intermédiaires entre les nombres observés, dans les tables relatives au pyromètre thermo-électrique, et que l'on trouve l'intensité du courant électrique correspondant à une température donnée quand on connaît les intensités relatives à deux températures voisines de celle-ci.

Pour les températures inférieures à 0°, on a plongé le couple, convenablement entouré d'un tube de verre, dans une petite éprouvette contenant 20 ou 30 grammes de protoxyde d'azote liquide. Au moment où le protoxyde d'azote est entré en ébullition, la température est restée constante et a donné une déviation également constante au magnétomètre. A la suite de cette expérience, on a fait solidifier du mercure dans l'éprouvette, et l'on a attendu que le métal se liquéfiât ; on a eu une température fixe, et l'on a admis les deux nombres — 87,9 et — 38,5 trouvés par M. Regnault à l'aide du thermomètre à air comme indiquant les températures fixes lors de ces changements d'état.

D'après cela, on aurait pour les valeurs de A et B dans la formule $I = AT + BT^2$ :

| | VALEUR DE | |
|---|---|---|
| | A. | B. |
| De — 100 à — 50° | 0,8384 | 0,000388 |
| De — 50 à + 50 | 0,8860 | 0,001339 |
| De 50 à 100 | 0,9058 | 0,000942 |
| De 100 à 150 | 0,9104 | 0,000896 |
| De 150 à 200 | 0,9389 | 0,000706 |
| De 200 à 250 | 0,9577 | 0,000612 |
| De 250 à 300 | 0,9982 | 0,000450 |
| De 300 à 350 | 1,2010 | —0,000226 |

Au moyen de ces deux tableaux, on a donc les degrés pyrométriques du couple platine-palladium par rapport aux températures centigrades données par le thermomètre à air.

J'ai cherché à déterminer les températures de quelques points fixes de changements d'état des corps, tels que celles de la fusion ou de la volatilisation des métaux, points fixes qui, de même que la fusion de la glace, l'ébullition de l'eau ou du mercure, ont lieu à des températures constantes quand les corps sont purs.

Le pyromètre employé est celui qui a été représenté fig. 1, et dont les fils, convenablement protégés par les tubes en porcelaine, n'ont pu être altérés par les vapeurs ou les métaux en fusion. Les indications de l'appareil ont été rapportées à celle qui est relative à la température de l'ébullition de l'eau, et qui a été prise égale à 100. Quant aux points de fusion de l'or et de l'argent, on va voir, page suivante, comment ils ont été déterminés.

On a obtenu ainsi les résultats indiqués dans la deuxième colonne du tableau suivant :

| | INTENSITÉ du courant thermo-électrique ou degré pyrométrique du couple. | TEMPÉRATURE fixe admise. |
|---|---|---|
| Ébullition du protoxyde d'azote à 760$^{mm}$ de pr. | —70,7 | —87°,9 |
| Fusion du mercure ..... | —31,7 | —38,5 |
| Ébullition de l'eau à 760$^{mm}$ de pression... | 100,0 | 100,0 |
| Ébullition du mercure à 764$^{mm}$,42..... | 401,5 | 358,5 |
| Ébullition du soufre à 767$^{mm}$,12..... | 535,3 | (1) 448,3 |
| Ébullition du cadmium ordinaire à 760$^{mm}$. | 1060,0 | » |
| Ébullition du zinc ordinaire à 760 $^{mm}$.... | 1445,0 | (2) 891 |
| Fusion de l'argent..... | 1504,24 | » |
| Fusion de l'or ..... | 1805,11 | » |
| Fusion du cuivre rouge..... | 2120,0 | » |

On a reconnu que dans la vapeur de soufre, dans celle du zinc, comme dans celle de l'eau et du mercure, la température est restée constante du moment que l'ébullition s'est produite. Dans la vapeur de zinc, cette température est restée inférieure à celle de la fusion de l'argent, quoique d'un petit nombre de degrés.

Après avoir déterminé les points d'ébullition de plusieurs liquides, j'ai cherché à évaluer les températures de fusion de différents métaux, et principalement de l'argent et de l'or, qui fondent à des degrés assez élevés. J'ai alors disposé l'appareil comme on l'indique dans la figure 2, de manière à mettre dans le tube horizontal en porcelaine AB qui traverse le fourneau, d'un côté le couple thermo-électrique platine-palladium, dont les fils sont représentés en P et Q, de l'autre, à l'aide d'une tige en fer L, un anneau également en fer DE, vu en coupe dans le tube et représenté en plan à côté de ce tube. Cet anneau en fer se maintient au milieu du tube en terre, et supporte trois petits crochets en platine *a a′ a″*, dont la longueur a au plus $\frac{1}{3}$ du diamètre de l'anneau. A ces petits crochets se trouvent suspendus des petits fils d'argent, d'or, de platine, qui ne tou-

(1) M. Regnault, dans ses recherches sur les chaleurs latentes (*Mémoires de l'Académie des sciences*), a trouvé 447,3 pour la température d'ébullition du soufre à 760$^{mm}$ de pression; cela ferait 448,3 à 767$^{mm}$, 12.

(2) J'ai déterminé ce nombre directement avec un thermomètre à air à enveloppe en porcelaine vernissée. Voir *Annales du Conservatoire impérial des arts et métiers*, t. 4, p. 604.

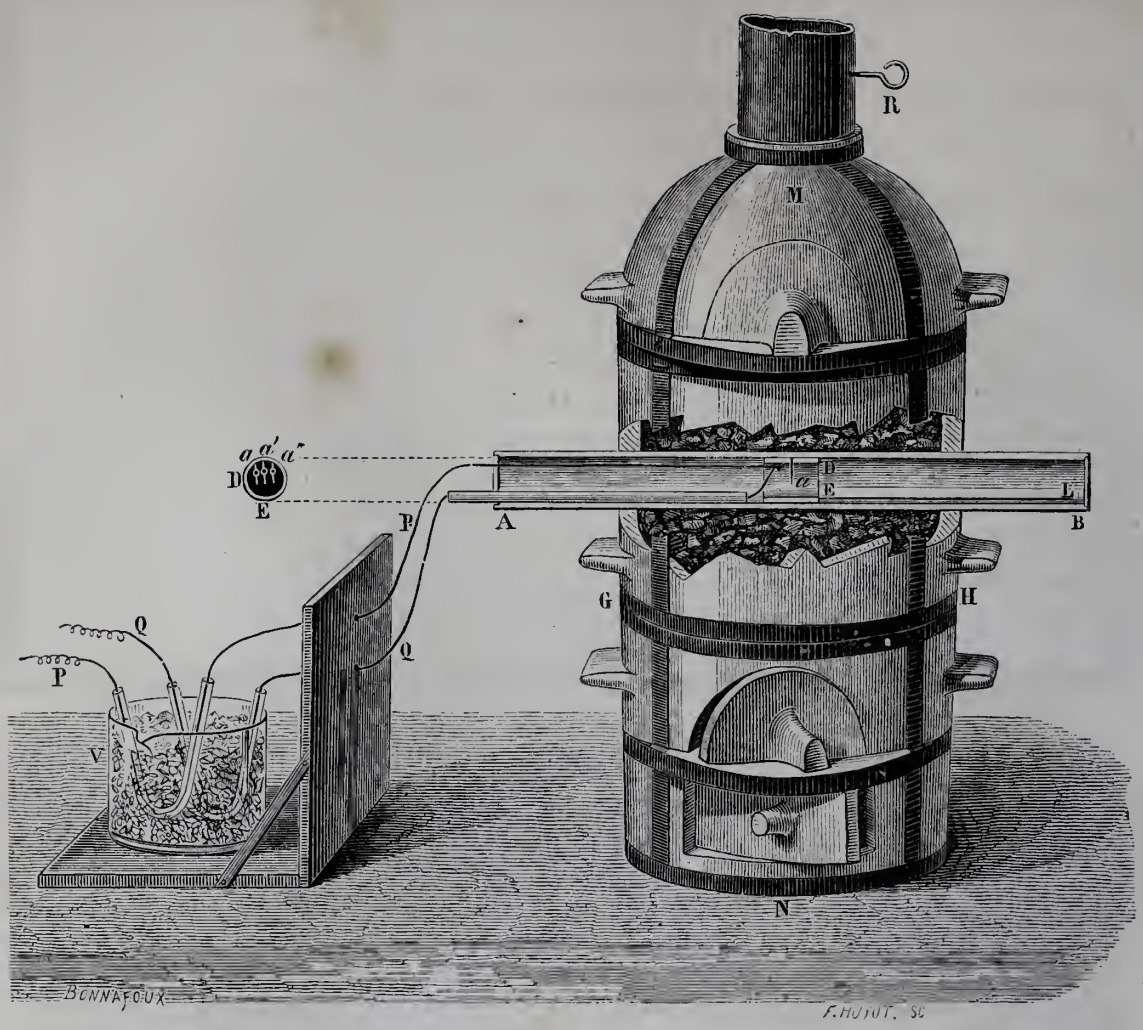



Fig. 2.

chent pas à l'anneau ; ils ont au plus la moitié de son diamètre, et, étant librement suspendus, ils se placent verticalement dans l'appareil. D'après cette disposition, si l'on fait mouvoir convenablement la tige L, on peut placer les points de jonction du couple thermo-électrique très-près des fils *a a' a''*, de façon qu'à chaque instant les différents fils et le couple thermo-électrique peuvent être considérés comme étant à la même température. L'extrémité B du tube A B est fermée par un disque de verre mince qui entre à frottement à l'extrémité de ce tube, et différents écrans en bois, percés d'ouvertures, sont interposés entre le fourneau et l'observateur. On peut donc, à l'aide d'une petite lunette, non-seulement voir à quel moment les fils d'argent et d'or entrent en fusion, mais encore reconnaître, si l'on opère dans une chambre noire, à quelle limite un fil de platine suspendu, ou les extrémités des fils du couple lui-même, commencent à devenir lumineux. Quand les fils métalliques sus-

pendues a, a′, a″, fondent, c'est par l'extrémité libre que la fusion se produit d'abord.

J'ai comparé le pyromètre à air avec le pyromètre thermo-électrique en plaçant dans le tube en porcelaine de la figure 2 le réservoir en porcelaine d'un pyromètre à air, et j'ai pu suivre concurremment l'indication de la température du pyromètre à air et la déviation donnée par le couple thermo-électrique dans le magnétomètre (1). J'ai pu déterminer ainsi un certain nombre de points placés entre 600° et 1200° centigrades; mais pour les points intermédiaires, j'ai pu les calculer par une remarque assez simple, c'est que pour des températures peu différentes, en nommant I l'intensité du courant électrique déterminé à l'aide du magnétomètre et T la température correspondante, l'expression

$$3 \log T - 2 \log I$$

varie peu. Quand la différence devient plus grande, on peut considérer expression

$$3 \log T - 2 \log I = A - \frac{B}{T},$$

dans laquelle A et B sont deux constantes, comme exprimant les températures.

Entre les limites de température de 500 à 1200, les résultats des expériences n'ont pas différé de quelques degrés des nombres calculés par cette expression empirique dans laquelle A = 2,5629718 et B = 29,47, de sorte que cette expression est :

$$3 \log T - 2 \log I = 2{,}5629718 - \frac{29{,}47}{T}$$

En réunissant les résultats des expériences de comparaison avec ceux qui ont été obtenus entre 0 et 358°,50, on peut alors former le tableau suivant, qui donne pour le couple dont j'ai fait usage les températures correspondantes aux indications du pyromètre thermo-électrique :

(1) Voir *Ann. du Conservatoire des arts et métiers*, t. IV, p. 597.

| TEMPÉRATURE centigrade T. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique I. | TEMPÉRATURE centigrade T. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique I. | TEMPÉRATURE centigrade T. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique I. | TEMPÉRATURE centigrade T. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique I. | TEMPÉRATURE centigrade T. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique I. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| 0 | 0 | 300 | 339,95 | 600 | 813,39 | 900 | 1466,39 | 1200 | 2236,48 |
| 10 | 8,99 | 310 | 350,59 | 610 | 832,94 | 910 | 1490,25 | 1210 | 2263,96 |
| 20 | 18,26 | 320 | 361,18 | 620 | 852,84 | 920 | 1514,30 | 1220 | 2291,56 |
| 30 | 27,79 | 330 | 371,72 | 630 | 872,80 | 930 | 1538,45 | 1230 | 2319,27 |
| 40 | 37,58 | 340 | 382,21 | 640 | 892,91 | 940 | 1562,72 | 1240 | 2347,09 |
| 50 | 47,65 | 350 | 392,66 | 650 | 913,17 | 950 | 1587,12 | 1250 | 2375,02 |
| 60 | 57,74 | 360 | 403,06 | 660 | 933,59 | 960 | 1611,65 | 1260 | 2403,05 |
| 70 | 67,56 | 370 | 415,10 | 670 | 954,15 | 970 | 1636,30 | 1270 | 2431,21 |
| 80 | 78,49 | 380 | 428,56 | 680 | 974,87 | 980 | 1661,07 | 1280 | 2459,47 |
| 90 | 89,14 | 390 | 442,72 | 690 | 995,73 | 990 | 1685,97 | 1290 | 2487,83 |
| 100 | 100,00 | 400 | 457,31 | 700 | 1016,76 | 1000 | 1711,00 | 1300 | 2516,30 |
| 110 | 110,99 | 410 | 472,50 | 710 | 1037,90 | 1010 | 1736,15 | 1310 | 2544,89 |
| 120 | 122,15 | 420 | 488,30 | 720 | 1059,20 | 1020 | 1761,41 | 1320 | 2573,58 |
| 130 | 133,49 | 430 | 504,81 | 730 | 1080,65 | 1030 | 1786,80 | 1330 | 2602,38 |
| 140 | 145,02 | 440 | 521,50 | 740 | 1102,24 | 1040 | 1812,31 | 1340 | 2631,28 |
| 150 | 156,72 | 450 | 538,37 | 750 | 1123,96 | 1050 | 1837,94 | 1350 | 2660,29 |
| 160 | 168,30 | 460 | 555,50 | 760 | 1145,84 | 1060 | 1863,69 | 1360 | 2689,41 |
| 170 | 179,99 | 470 | 572,81 | 770 | 1167,85 | 1070 | 1889,56 | 1370 | 2718,63 |
| 180 | 191,88 | 480 | 590,30 | 780 | 1190,00 | 1080 | 1915,55 | 1380 | 5747,96 |
| 190 | 203,88 | 490 | 607,97 | 790 | 1212,29 | 1090 | 1941,66 | 1390 | 2777,39 |
| 200 | 216,03 | 500 | 625,81 | 800 | 1242,22 | 1100 | 1967,88 | 1400 | 2806,93 |
| 210 | 228,11 | 510 | 643,82 | 810 | 1257,28 | 1110 | 1994,22 | | |
| 220 | 240,32 | 520 | 662,00 | 820 | 1279,98 | 1120 | 2021,68 | | |
| 230 | 252,65 | 530 | 680,35 | 830 | 1302,82 | 1130 | 2047,25 | | |
| 240 | 265,10 | 540 | 698,86 | 840 | 1325,79 | 1140 | 2073,94 | | |
| 250 | 277,67 | 550 | 717,56 | 850 | 1348,90 | 1150 | 2100,75 | | |
| 260 | 289,95 | 560 | 736,24 | 860 | 1372,13 | 1160 | 2127,67 | | |
| 270 | 302,32 | 570 | 755,40 | 870 | 1395,50 | 1170 | 2154,70 | | |
| 280 | 314,78 | 580 | 774,57 | 880 | 1419,00 | 1180 | 2181,85 | | |
| 290 | 327,32 | 590 | 793,88 | 890 | 1442,63 | 1190 | 2209,11 | | |

Le tableau précédent se rapporte au platine et au palladium dont j'ai fait usage ; en employant d'autres fils métalliques, on aurait probablement d'autres valeurs. Mais une formule empirique de même forme pourrait s'appliquer, et, à l'aide des points fixes que j'ai donnés, il serait facile pour chaque pyromètre thermo-électrique de faire une table des intensités correspondantes aux températures.

§ 2. *Température à laquelle les corps deviennent lumineux. Intensité des rayons émis ; photomètre destiné à son évaluation.*

La disposition de l'appareil représenté fig. 2 permet de placer les corps dans le tube en porcelaine horizontal fixé au travers d'un fourneau, et d'étudier la lumière émise par les corps solides quand ils sont soumis à l'action de la chaleur.

D'après cette disposition, les corps dont on étudie le rayonnement sont placés au milieu d'une enceinte portée à une température plus ou moins élevée, et qui est à peu près constante au moment où l'on fait l'observation. A cet instant, l'on peut admettre que l'enceinte et le corps sont à la même température. Quelle est alors l'influence des parois lumineuses par incandescence de l'enceinte sur l'intensité de la lumière émise par le corps? Si le corps avait un pouvoir émissif plus faible que celui de l'enceinte, l'intensité de la lumière émise serait influencée par celle des parois; mais si l'on se borne au cas où le corps n'est pas doué d'un pouvoir réflecteur régulier, et ne donne que de la lumière diffusée, et que de plus l'enceinte ait le même pouvoir émissif que lui, on peut dire que le corps, émettant autant qu'il reçoit, l'intensité de la lumière qu'il émet doit être la même que si l'enceinte n'existait pas et que si le corps, étant isolé, était maintenu par une cause quelconque à une température constante et égale à celle de cette enceinte.

Il était nécessaire de vérifier par expérience s'il en est réellement ainsi : c'est ce qui a été fait en prenant pour source lumineuse les points de jonction des fils de platine et de palladium formant le couple thermo-électrique, en déterminant à chaque instant la température de ces points incandescents au moyen de l'intensité du courant thermo-électrique, et en plaçant ceux-ci successivement dans le tube en porcelaine échauffé, et dans la flamme d'un bec de gaz hydrogène mélangé d'air, flamme très-peu lumineuse. Pour les mêmes déviations, on a eu sensiblement la même intensité dans les deux cas, ou du moins les différences, si elles existent, n'ont pas été appréciables, eu égard aux erreurs que peuvent présenter les expériences elles-mêmes. Ainsi la lumière émise par l'enceinte n'intervient pas dans l'intensité de la lumière émise par le platine et par le palladium dont on étudie l'irradiation, lorsque l'enceinte et ces corps sont à la même température. On verra aussi plus loin qu'en raison de ce fait, des corps de même pouvoir émissif et de forme différente sont lumineux de la même manière. Du reste, dans cette circonstance, le tube en porcelaine qui forme l'enceinte a sensiblement le même pouvoir émissif que le platine, la chaux, la magnésie et le charbon, dont on a étudié l'irradiation.

Pour soumettre à l'expérience les corps de nature différente, on a placé ces corps au milieu du tube en porcelaine AB (fig. 2), de façon qu'ils ne se touchent pas et qu'ils aient entre eux un intervalle tel que leur image puisse être vue isolément avec le photomètre qui sera dé-

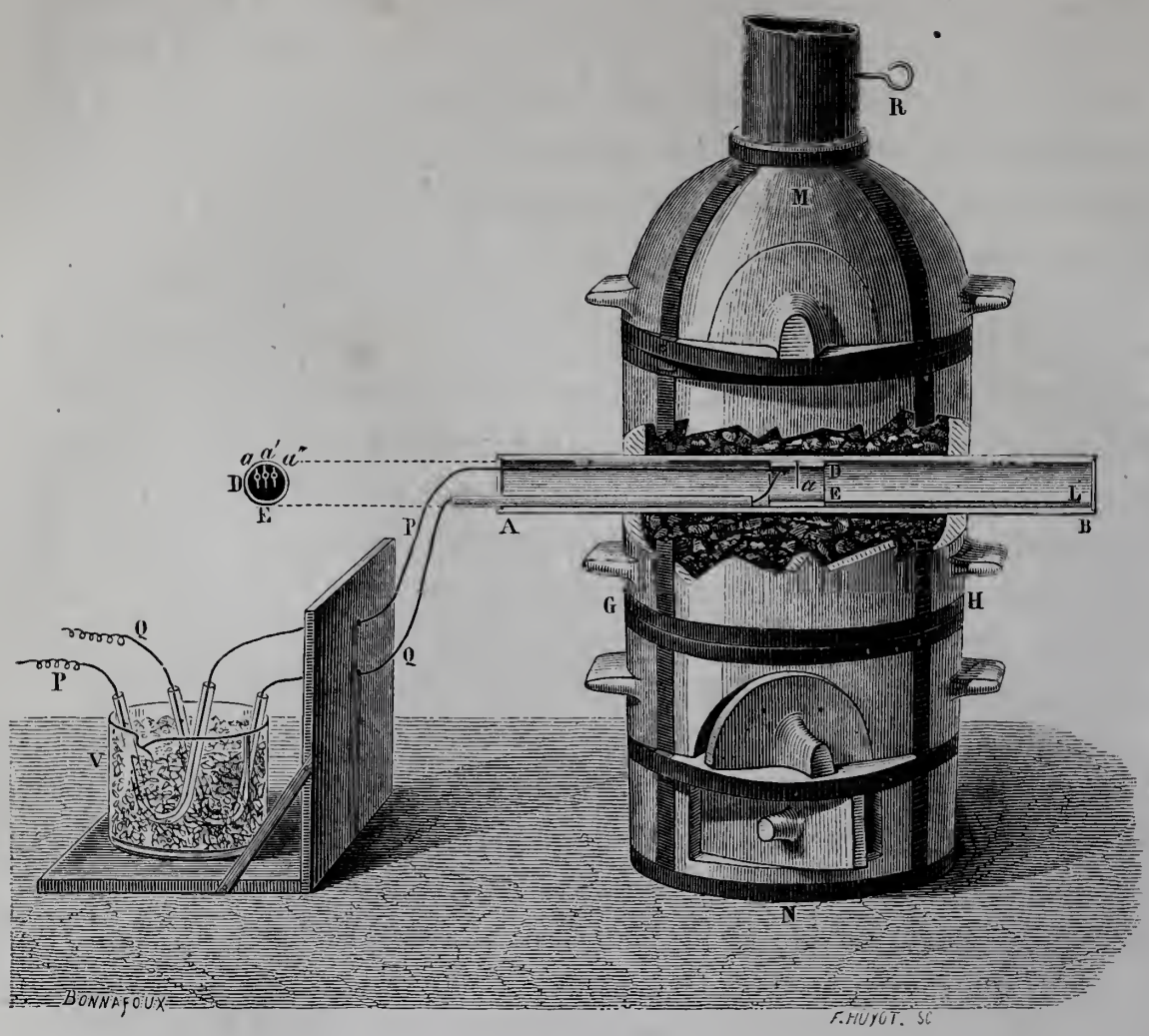



Fig. 2.

crit ci-après. On a aussi placé à côté d'eux les points de jonction du couple thermo-électrique. Afin d'éviter le refroidissement des corps placés au milieu du tube, l'extrémité A était fermée avec de la terre, et en même temps la longueur A B était telle que, A restant obscur, l'observateur, en regardant dans l'axe du tube, pouvait voir les objets lumineux placés en *a* projetés sur un fond obscur A. Cette condition est indispensable pour la comparaison des effets lumineux des corps incandescents. L'extrémité B était fermée avec une lame de verre très-mince taillée circulairement et entrant à frottement à l'extrémité B dans le tube en porcelaine ou en terre. Dans cette position, cette lame de verre se conserve intacte, tandis que lorsque ses bords dépassent les bords des parois du tube, elle se brise. Cette plaque de verre permet donc de faire aisément les observations en évitant le refroidissement des corps qui deviennent lumineux par irradiation.

Dans plusieurs expériences, on a placé au milieu du tube A B, qui avait

5 centimètres de diamètre intérieur, un second tube en terre ou en porcelaine de 15 à 20 millimètres ; on a pu alors opérer sans mettre en B des petites lames de verre. Un second écran, qui est une simple planche munie d'une ouverture, est placée à 30 ou 40 centimètres du fourneau ; elle isole l'observateur et l'empêche d'être incommodé par le rayonnement qui émane de ce fourneau.

La limite relative à la température à laquelle les corps solides commencent à devenir lumineux, quand on est placé dans l'obscurité, est très-difficile à apprécier ; si l'on opère par élévation de température, les bords du tube en terre fixé dans le fourneau rougissent avant les fils intérieurs dont on observe l'irradiation et qui forment l'extrémité du couple thermo-électrique lui-même, mais une portion de la lumière émise se réfléchissant par diffusion sur les fils, ces derniers ne sont pas vus alors en vertu de leur action propre. Si l'on opère, au contraire, lorsque le fourneau est en voie de refroidissement, l'inverse a lieu, et l'on peut plus facilement saisir le décroissement de lumière ; mais il est à peu près impossible de saisir le moment précis où cesse le pouvoir qu'a le corps d'émettre des rayons lumineux : tout ce que l'on peut dire, c'est que si l'on est placé dans l'obscurité profonde, à 510° la lumière émise est excessivement faible ; à 488° ou 490° on saisit encore des traces de lumière dont l'intensité est à peine appréciable, mais que l'on peut distinguer, et à 460° il n'y a plus aucun effet. On peut donc, sans erreur bien grande, prendre un terme compris entre 480° et 490° pour celui où les corps solides commencent à émettre quelque trace de lumière dans l'obscurité par l'action de la chaleur, ou bien en nombre rond celui de 500°, qui a été admis généralement jusqu'ici pour la limite où les substances commencent à devenir visibles dans une enceinte faiblement éclairée, de façon que tout observateur puisse commencer à percevoir nettement les rayons lumineux émis, quoique encore très-sombres.

Ce qui précède suppose que les différents corps solides commencent à devenir lumineux par incandescence à partir de la même limite ; mais en est-il réellement ainsi ?

Il est évident que les corps doivent commencer à émettre des rayons d'une longueur d'onde déterminée à une température fixe, la même pour tous. Mais comme ils ont des pouvoirs émissifs différents, il s'agit de savoir s'ils deviendront visibles à partir de la même limite, alors qu'ils émettent des rayons de même réfrangibilité avec des intensités

inégales. Ils ne seraient pas vus en même temps à partir de la même limite de température, si l'on comparait, par exemple, les gaz qui sont très-peu lumineux avec des corps solides qui le sont beaucoup; mais quand il s'agit des corps solides comparés entre eux, tels que ceux qui ont été cités plus haut, il est facile de voir que les différences dues à cette cause ne peuvent être appréciées expérimentalement. En effet, d'abord la différence entre leur pouvoir émissif d'irradiation n'est pas bien grande, même si l'on compare le platine aux oxydes de cuivre et de fer; mais, d'un autre côté, d'après les expériences qui vont être indiquées plus loin, si l'on cherche, à partir de la limite de température T à laquelle tous les corps commencent à émettre des rayons dont la longueur d'onde correspond à celle qui est nécessaire pour qu'il y ait une impression sur la rétine, quelles sont les intensités à T + 1° et à T + 2°, on trouve que ces intensités sont sensiblement comme 1 : 2, c'est-à-dire que, près de la limite dont il est question, une simple différence de 1° dans la température d'un même corps peut à peu près doubler l'intensité de la lumière émise. On sait également que l'œil peut saisir des différences entre les intensités lumineuses de deux corps voisins quand cette différence est de $\frac{1}{60}$, et même on peut aller au delà quand il s'agit de lumières peu intenses; or, comme on ne peut être certain de la température à 1° près dans les températures élevées, on voit que les corps opaques comparés entre eux doivent devenir sensiblement visibles à partir de la même limite, qui est, d'après ce qui précède environ 490°, c'est-à-dire une température un peu inférieure à 500°.

Pour comparer les intensités lumineuses, j'ai fait usage d'un photomètre (1) fondé sur l'emploi de la double réfraction, et qui est representé fig. 3; il permet de comparer directement l'éclat de surfaces égales de deux sources lumineuses. Pour atteindre ce but, l'appareil se compose de deux petites lunettes APO, BPO de 40 centimètres de longueur sur 4 centimètres de diamètre, dont les axes sont placés à angle droit sur une moitié de leur longueur et qui ont le même oculaire O. Un prisme en verre, à angle droit, placé au point de croisement P des lunettes, donne par réflexion totale aux rayons qui pénètrent suivant B une direction telle que l'observateur peut voir en même temps à

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, 3e série, 1861, t. LXII, p. 15, et *Ann. du Conservatoire des arts et metiers*, t. IV, p. 597.

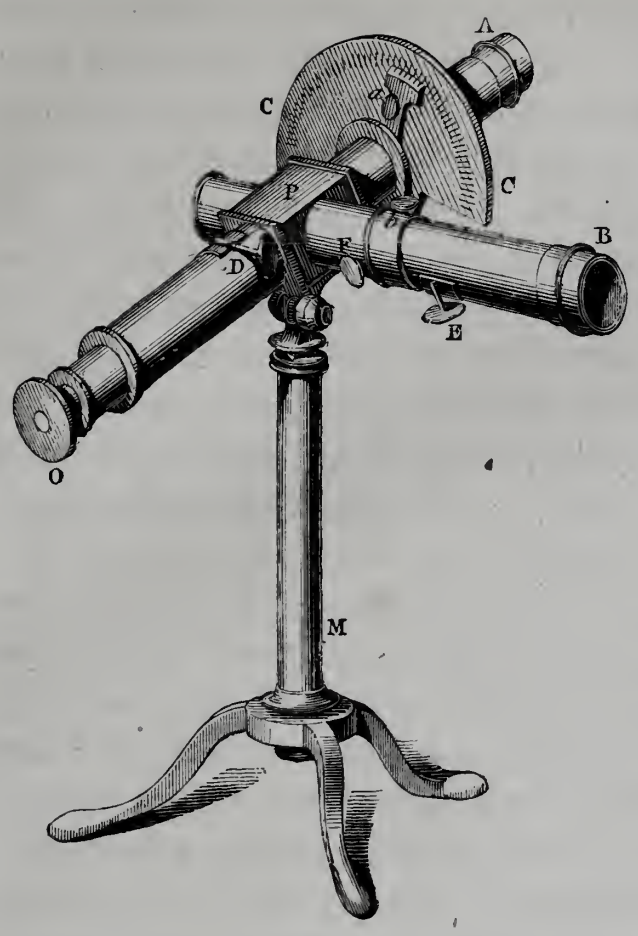


Fig. 3.

l'aide de l'oculaire O deux images placées à côté l'une de l'autre, l'une formée par l'objectif A, l'autre par l'objectif B.

L'appareil est monté de telle manière que le tube B peut être placé d'un côté ou de l'autre, de façon à viser la lumière servant de terme de comparaison à droite ou à gauche. Un système de deux prismes ordinaires de Nicol est placé dans l'axe de la lunette latérale B, et l'un d'eux est mobile, de façon que l'on peut donner à l'intensité lumineuse de l'image vue par cette lunette, la valeur que l'on veut depuis l'intensité maximum totale de la lampe correspondant au parallélisme des sections principales des prismes de Nicol jusqu'à l'extinction presque complète.

Un autre système de deux prismes de Nicol, dont les faces terminales sont taillées perpendiculairement à l'axe, est placé dans l'axe de la partie A de la lunette droite, et l'un d'eux est mobile de façon à pouvoir décrire un angle variable de 0 à 90°, que l'on peut mesurer sur un cercle divisé CC; on peut aisément lire la minute sur le cercle.

On voit donc qu'une fois l'intensité et la couleur de la lumière normale vue en B, ayant le degré voulu, il n'y a plus qu'à juxtaposer l'image de cette lumière avec celle de la source que l'on étudie vue par la lunette A, et cela peut être fait à l'aide d'un léger mouvement donné au pied de l'appareil; on fait ensuite varier l'intensité de cette lumière en tournant le bouton *a* de façon à la rendre égale à la première.

Dans les expériences dont il s'agit ici, comme on compare la lumière émise par un fil de platine, par une lame de métal, ou bien par un fragment d'un corps placé au milieu du tube, à la lumière émise par une lampe placée dans une espèce de lanterne munie d'un écran à ouver-

ture rectiligne dont la largeur est variable, on donne à cette dernière ouverture la même dimension angulaire que celle du fil ou de la lame de métal incandescente soumise à l'expérience, de façon à voir à la fois par l'oculaire O du photomètre deux images lumineuses de même étendue et juxtaposées. Il faut remarquer, comme on l'a déjà dit, que les corps incandescents étant placés au milieu d'un tube en terre ou en porcelaine qui traverse le fourneau de part en part, sont vus isolément et sans que des rayons lumineux émanés dans le voisinage viennent modifier les effets observés. Quant à la lumière qui proviendrait des gaz portés à l'incandescence et qui environnent le fil de platine, elle est tellement faible par rapport à la lumière émise par le platine, qu'on peut la négliger.

La méthode expérimentale dont on a fait usage est très-simple : on examine la lumière de la lampe prise pour unité, par la lunette latérale du photomètre, et à l'aide de verres colorés et des prismes de Nicol de cette lunette on lui donne une faible intensité, qui doit rester constante pendant toute la durée d'une même observation. On vise alors le corps incandescent au moyen de la lunette droite A du photomètre, et à l'aide d'un verre coloré placé devant l'objectif on donne à cette lumière la même couleur qu'à celle de la lampe. Cela fait, au moyen de l'alidade *a*, qui met en mouvement le prisme de Nicol dont les faces terminales sont taillées perpendiculairement à l'axe de la lunette, on fait varier l'angle des sections principales des deux prismes placés dans le corps de cette lunette droite, et dès lors on fait varier l'intensité de la lumière reçue par l'observateur suivant la loi connue du carré du cosinus. On peut donc amener cette lumière à avoir la même intensité que celle de la lumière de la lampe. On voit qu'à l'aide de ce moyen non-seulement on peut comparer l'intensité des rayons d'une réfrangibilité déterminée émis par les corps incandescents, mais encore quand les lumières à comparer sont peu intenses, leur couleur étant la même, que cette comparaison peut avoir lieu avec autant d'exactitude que par la méthode des ombres. De plus, les intensités restant les mêmes pendant toute la durée d'une même série d'observations, la limite de l'erreur que l'on peut commettre reste la même dans chaque détermination. Cette limite est telle que, si les prismes de Nicol de la lunette droite ont de 40° à 50° entre les positions de leurs sections principales, un mouvement de 5 minutes de degré dans un sens ou dans l'autre fait apparaître une différence dans

l'éclat des lumières que l'on compare. Si l'angle devient plus grand, alors la limite d'erreur est moindre.

On doit donc, comme on le voit, ramener toujours l'intensité de la lumière que l'on étudie à avoir une valeur constante. Ce résultat exige que la lampe Carcel placée dans la lanterne ait une intensité constante ; quand elle est bien montée, on peut y arriver avec exactitude pendant au moins une heure ; mais d'un jour à l'autre il peut y avoir de faibles différences.

J'ai fait également usage d'un autre photomètre plus simple, dans lequel il n'y a qu'un système de prismes de Nicol ; mais l'appareil décrit ici est d'un meilleur emploi.

Si l'on cherche à étudier l'émission lumineuse d'un fil de platine de $\frac{1}{2}$ à 1 millimètre de diamètre fixé verticalement au milieu du tube en porcelaine, on reconnaît aisément que la couleur de la lumière émise change rapidement depuis le rouge sombre près de 500°, jusqu'à la teinte orangé clair, vers 1200°. Au-dessous de 700° à 750°, on ne peut guère évaluer avec le photomètre l'intensité de la lumière ; au delà la lumière devient de plus en plus jaune, et après la fusion de l'or elle est plus blanche. Mais dans les limites de 750° à 1000° on peut, en plaçant devant l'ouverture éclairée par la lampe un verre jaune clair, comparer à cette lumière jaune celle du platine incandescent, quoique ce dernier émette une lumière un peu plus rougeâtre vers 800° et un peu plus blanche quand on atteint 1000°. Ainsi, entre certaines limites on pourrait à la rigueur comparer en totalité les intensités de la lumière émise par les corps incandescents. Si l'on veut comparer entre elles les intensités des rayons correspondant à une réfrangibilité donnée, telle que le rouge ou le vert, et qui seraient émis à diverses températures, comme on l'a fait dans la presque totalité des expériences, il suffit de mettre des écrans de cette couleur non-seulement devant la lampe, mais encore devant l'ouverture du photomètre.

On a commencé par comparer les intensités de la lumière émise par plusieurs corps situés à côté les uns des autres sur un même plan dans l'intérieur du tube en porcelaine, perpendiculairement à la longueur du tube, et espacés l'un de l'autre de façon qu'à l'aide de la lunette du photomètre on pût les étudier séparément. On a placé ainsi : 1° un fil de platine de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre ; 2° une lame plane en platine de 5 millimètres de largeur et dont la surface était mate ; 3° une lame de platine recourbée en forme de demi-cylindre à axe vertical,

tournant sa concavité vers l'observateur ; 4° enfin une mèche d'asbeste de 3 à 4 millimètres d'épaisseur. Les intensités lumineuses ont été sensiblement les mêmes, quand la température a été partout uniforme, et cependant la lumière émise par le fond de la partie courbe de la lame de platine ne pouvait être influencée par les parois du tube en porcelaine.

On pourrait supposer que les corps avec lesquels j'ai agi fussent doués d'un pouvoir réfléchissant assez fort, et que la lumière émise par eux contînt une partie de celle de l'enceinte réfléchie sur leur surface; mais il est aisé de montrer que cette supposition ne saurait être admise, le platine non poli présentant, comme le kaolin, le charbon, la magnésie, sensiblement le même pouvoir émissif à la température rouge.

On a disposé d'abord à côté l'un de l'autre parallèlement, dans le gros tube en porcelaine AB, deux tubes plus petits : l'un en porcelaine, l'autre en platine. Au milieu du tube en porcelaine on a mis un fragment de kaolin, et au milieu de celui en platine on a fixé une lame de platine; puis on a porté simultanément les deux tubes et les corps au rouge. On voit que le kaolin était entouré d'une enceinte en porcelaine, et le platine, de platine; dans ces conditions, au rouge blanc, on n'a pu constater avec le photomètre aucune différence appréciable entre les intensités lumineuses des deux corps. Ces deux substances, comme leurs enceintes, ont donc sensiblement le même pouvoir émissif.

Enfin, la meilleure démonstration de ce fait, démonstration qui suffit seule pour les expériences faites ici, consiste à placer le couple platine-palladium successivement dans le tube, puis dans la flamme d'un bec de gaz, comme on l'a dit plus haut, et à évaluer l'intensité de la lumière rouge émise en plaçant des verres rouges devant les deux oculaires du photomètre : on a observé sensiblement la même intensité dans l'un et l'autre cas, quand la température indiquée par le couple était la même.

On a mis dans le tube AB de la fig. 2, situé au milieu du fourneau, différents corps solides, et l'on a étudié leur intensité lumineuse depuis le moment où ils commencent à devenir tous lumineux, c'est-à-dire depuis 480° à 490° jusqu'aux températures les plus élevées que le fourneau peut donner. Dans ces conditions, le platine et l'asbeste, ainsi que le charbon de cornue, la chaux et la magnésie, ont donné sensiblement les mêmes effets au photomètre ; il en a été de même de l'or

jusqu'à sa fusion. Quant aux métaux oxydables, comme le cuivre et le fer, la couche d'oxyde qui les enveloppe et qui se forme à leur surface au moment de leur élévation de température dans le tube en porcelaine, a sans doute un pouvoir d'irradiation moindre que le platine à température égale, car les images qu'ils présentent sont moins lumineuses que celles données par ce dernier métal. Comme on le verra plus loin, les pouvoirs émissifs du platine et du cuivre sont différents depuis 500° à 600° jusqu'au point de fusion du cuivre, et le cuivre a une irradiation moins forte. Mais quand la température s'élève et s'approche de celle de la fusion du cuivre rouge, cette différence devient à peine sensible, et le cuivre paraît à peu près aussi lumineux que le platine. Le cuivre et le fer, placés dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène conduisent aussi à la même conclusion. L'argent a présenté au contraire, dans quelques expériences jusqu'à sa fusion, une lumière un peu plus blanche et un peu plus vive que celle du platine; mais cette différence n'a pu être évaluée au photomètre; tient-elle à un pouvoir d'irradiation plus grand du fil d'argent ou à la réflexion sur sa surface d'une certaine quantité de lumière émanée de quelques points de l'enceinte qui pouvaient avoir à un moment donné une température plus élevée que celle du fil d'argent? C'est ce que je n'ai pu décider.

En somme, pour un certain nombre de corps opaques, comme les les métaux inoxydables tels que le platine et le palladium, dont la surface est mate, le charbon, l'asbeste, la chaux, on peut admettre un pouvoir d'irradiation qui est sensiblement le même; pour d'autres, comme on l'a vu, il est différent.

Les expériences suivantes ont été faites en prenant pour corps lumineux la réunion des deux fils de platine et de palladium servant de couple thermo-électrique. On a déterminé à chaque instant la température à l'aide du courant électrique donné par ce couple, et l'intensité lumineuse des rayons rouges vus à travers un verre rouge coloré par le protoxyde de cuivre. Les rayons qui traversent ce verre forment la partie du spectre comprise entre la raie noire A et un intervalle compris entre C et D, à un tiers environ de la distance CD, le maximum d'action correspondant à un espace situé entre B et C. On aurait pu employer la réunion d'un verre rouge avec un verre bleu de cobalt qui donne une partie rouge moins orangée que la précédente; mais un écran obtenu ainsi est trop sombre pour les observations.

On a opéré la première fois en chargeant le fourneau avec du coke et ensuite en employant le charbon de cornue, ce dernier combustible permettant d'atteindre une température bien plus élevée. Les observations ont été faites pendant que le fourneau présentait une augmentation graduelle de température, au moment du maximum, et ensuite pendant la période du refroidissement. On trouve aisément, en raison du grand nombre d'observations faites, quelles sont les indications du magnétomètre, et par conséquent les intensités du courant thermo-électrique qui sont relatives à une intensité donnée, au moment où la température est ascendante et quand elle est descendante. En général, on trouve pendant l'ascension une température un peu plus élevée que pendant la période descendante, quoique d'une faible quantité ; cet effet provient peut-être de ce que les parois du tube en terre sont dans le premier cas à une température un peu plus élevée, et dans le second moins élevée que la partie centrale, et de ce que la température des fils métalliques qui touchent aux parois du tube en terre se communique par conductibilité jusqu'à leur point de jonction. On prend alors la moyenne des deux déterminations. C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres qui sont renfermés dans les tableaux suivants.

On doit remarquer aussi que les angles observés sur le photomètre sont les angles mesurés depuis le point de croisement des sections principales des prismes de Nicol, et non depuis leur parallélisme ; comme on atténue toujours l'intensité de la lumière I qui vient du corps incandescent pour la rendre constante et égale à celle de la source prise pour unité, si l'on désigne par $\alpha$ l'angle précédemment indiqué, $I. \sin.^2\alpha$ sera une constante C dans chaque série d'expériences, de sorte que l'intensité lumineuse dans chaque cas sera proportionnelle à $\frac{C}{\sin.^2\alpha}$ ; si l'on passe aux logarithmes et que le rayon des tables soit R, on pourra prendre R pour constante C, et le rapport précédent deviendra $\frac{R}{\sin.^2\alpha}$ ; on aura donc $\log. I = \log. R - 2 \log. \sin. \alpha$. Les logarithmes des intensités lumineuses sont obtenus ainsi dans les tableaux suivants, et l'intensité lumineuse, quand les sections principales des prismes sont parallèles, est alors prise pour unité. Quant aux températures, on les déduit chaque fois de l'intensité du courant thermo-électrique et du tableau donné page 70 ; on prend comme termes de comparaison les points de fusion de fils d'or ou d'argent qui ont été observés dans chaque dé-

termination expérimentale, et dont les températures sont 1037° et 916°.

| RAYONS ROUGES. | ANGLE α observé depuis le croisement des prismes du photomètre. | LOGARITHME de I. | INTENSITÉ lumineuse I | | MAGNÉTOMÈTRE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | observée. | calculée. | Déviation observée. | Déviation rapportée à celle qui a lieu à 100°. | Température centigrade. |
| 12 décembre 1861. | Fusion de l'arg. | » | » | » | 261,0 | 1504,24 | 916,0 |
| | 90°? | 0? | 1 | 1,08 | 255,5 | 1472,55 | 902,6 |
| | 40.00' | 0,3838650 | 2,42 | 2,40 | 284,4 | 1639,00 | 970,6 |
| | 30.25 | 0,5912106 | 3,90 | 4,04 | 303,9 | 1751,38 | 1016,0 |
| | 20.35 | 0,9079780 | 8,09 | 8,18 | 330,9 | 1906,98 | 1076,7 |
| | 17.30 | 1,0437164 | 11,06 | 11,86 | 345,5 | 1991,12 | 1108,9 |
| | 12.20 | 1,3408024 | 21,92 | 20,91 | 368,1 | 2121,36 | 1157,6 |
| | 10.35 | 1,4719452 | 29,65 | 27,21 | 478,8 | 2183,03 | 1180,4 |
| | 8.25 | 1,6690012 | 46,68 | 44,39 | 399,0 | 2299,44 | 1222,5 |
| 21 décembre 1861. | Fusion de l'arg. | » | » | » | 258,5 | 1504,24 | 916,0 |
| | 43.30 | 0,3243756 | 2,11 | 2,04 | 288,8 | 1680,53 | 987,6 |
| | 33.15 | 0,5219742 | 3,33 | 3,19 | 305,5 | 1777,71 | 1026,4 |
| | 27.30 | 0,6711888 | 4,69 | 4,60 | 319,4 | 1858,59 | 1058,0 |
| | 21.15 | 0,8815324 | 7,61 | 7,83 | 340 | 1978,46 | 1103,6 |
| | 16.10 | 1,1105006 | 12,90 | 14,05 | 363 | 2112,30 | 1153,9 |
| | 13.30 | 1,2632694 | 18,35 | 18,09 | 373,2 | 2171,65 | 1175,5 |
| Id..... | 27.25 | 0,6736200 | 4,72 | 4,70 | 320 | 1862,08 | 1058,0 |
| | 19.45 | 0,9423806 | 8,76 | 8,13 | 341,3 | 1986,03 | 1106,7 |
| | 18.00 | 1,0200352 | 10,47 | 10,67 | 352,0 | 2048,29 | 1130,4 |
| | 13.10 | 1,2849520 | 19,27 | 20,48 | 378,0 | 2199,58 | 1186,5 |
| | 12.15 | 1,3466006 | 22,21 | 22,57 | 382,0 | 2222,86 | 1195,0 |
| | 10.30 | 1,4787340 | 30,11 | 29,59 | 393,0 | 2286,87 | 1219,0 |
| 24 Janvier 1862.... | Fusion de l'arg. | » | » | » | 255,0 | 1504,24 | 916,0 |
| | 47.20 | 0,2670602 | 1,85 | 1,83 | 280,0 | 1652,00 | 976,0 |
| | 37.25 | 0,4327546 | 2,71 | 2,86 | 297,0 | 1752,30 | 1016,4 |
| | 26.15 | 0,7111548 | 5,14 | 3,63 | 307,0 F. de l'or | 1805,11 | 1037,0 |
| | 19.32 | 0,9515868 | 8,95 | 7,04 | 331 | 1952,90 | 1094,3 |
| | 14.52 | 1,1815864 | 15,19 | 14,46 | 359 | 2118,10 | 1156,2 |
| | 11.40 | 1,3883622 | 24,46 | 24,49 | 380 | 2242,00 | 1202,2 |

On reconnaît à l'inspection de ce tableau avec quelle rapidité croît l'intensité lumineuse à mesure que la température s'élève. Il est assez difficile, en raison des erreurs que peuvent donner les méthodes photométriques et thermométriques employées, de reconnaître la loi en vertu de laquelle ces variations ont lieu, en supposant que cette loi soit simple; cependant, on peut s'assurer que les différences entre les logarithmes des intensités lumineuses sont sensiblement proportion-

nelles aux différences de température, ce qui montre qu'une formule exponentielle de la forme

$$I = a\left(e^{b(T-\theta)} - 1\right) \quad (1),$$

dans laquelle I est l'intensité lumineuse, T la température du corps, $\theta$ la température à laquelle les rayons lumineux de la réfrangibilité que l'on étudie commencent à être émis, $e$ la base des logarithmes adoptés, $a$ et $b$ des coefficients constants pour une même série d'expériences, peut sensiblement représenter les observations entre les limites où l'on a opéré. Cette formule, du reste, est analogue à la formule

$$V = ma^{\theta}\left(a^{t} - 1\right),$$

donnée par Dulong et Petit, et qui règle la vitesse du refroidissement des corps échauffés placés au milieu d'une enceinte vide.

Si l'on prend pour base des logarithmes $e = 10$, on trouve que la valeur de $b$ est sensiblement la même dans les quatre expériences; on a pour $b$ :

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}005102 \\ 0{,}004997 \\ 0{,}005001 \\ 0{,}004957 \end{array}\right\} \text{dont la moyenne est de } 0{,}005014.$$

Quant à la valeur de $a$, elle dépend de l'intensité de la lumière prise pour unité et à laquelle on compare la lumière émise par les corps incandescents; elle peut varier d'un jour à l'autre.

Puisqu'il s'agit de rayons rouges, on a vu précédemment que la température $\theta$, à laquelle l'émission commence, est voisine de 480° ou 490°, et s'il s'agissait des rayons lumineux rouges les moins réfrangibles, on devrait admettre pour $\theta$ cette valeur ; mais, comme on a fait usage de verres rouges laissant passer des rayons orangés, on peut sensiblement prendre pour $\theta$ la température de 500°. Il est facile de voir, du reste, que la formule servant à calculer I serait très-peu différente dans les deux cas, et que les différences porteraient seulement sur les logarithmes du coefficient $\frac{1}{a}$. J'ai admis cette dernière valeur de 500° pour $\theta$, et d'après cette supposition on a pour moyennes :

| | | $\text{Log}\frac{1}{a}$ | Valeur de $a$. |
|---|---|---|---|
| 1re expérience. . . . | | 1,9787217 | 0,0105020 |
| 2e | — | 2,1289660 | 0,0074380 |
| 3e | — | 2,1320528 | 0,0073781 |
| 4e | — | 2,1320000 | 0,0073791 |

Il est facile, d'après l'expression ci-dessus, connaissant $b$ et $a$, d'avoir I. C'est ainsi qu'ont été obtenues par le calcul les valeurs de T placées à côté des déterminations expérimentales dans le tableau précédent, page 81. Les différences entre les valeurs calculées et les valeurs observées sont tantôt dans un sens, tantôt dans un autre.

Ce ne sont pas seulement les rayons rouges qui donnent lieu à un accroissement d'intensité lumineuse avec la température, lequel paraît suivre une expression exponentielle de la forme indiquée plus haut; les autres rayons colorés conduisent à la même conséquence. On a opéré dans les deux séries d'expériences suivantes avec des verres verts et des verres bleus qui laissent passer, les premiers, les rayons verts et le commencement du bleu de l'image prismatique; les seconds, toute la partie la plus réfrangible du spectre. On n'a pas, au moyen de ces écrans colorés, des rayons d'une seule réfrangibilité comme avec les verres rouges, mais il ne m'a pas été possible jusqu'ici, vu la faible intensité de la lumière émise, d'opérer sur l'image d'un fil de platine réfractée au travers d'un prisme; on peut dire seulement que le verre de teinte verte ne laisse passer ni rouge ni orangé, et que le verre bleu donne le bleu de l'image prismatique sans trace de rouge.

| | PHOTOMÈTRE. | | | MAGNÉTOMÈTRE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ANGLE α depuis le croisement des prismes de Nicol. | LOGARITHME de I. | INTENSITÉ lumineuse I. | Déviation observée. | Déviation par rapport à celle qui a lieu à 100°. | Température. |
| 30 déc. 1861. LUMIÈRE VERTE. | Fusion de l'arg. | | » | 256,0 | 1504,24 | 916°0 |
| | 50°40' | 0,2231112 | 1,72 | 274,0 | 1610,02 | 959,3 |
| | 30.55 | 0,5784274 | 3,79 | 301,2 | 1769,85 | 1023,3 |
| | 22. 5 | 0,8497288 | 7,08 | 315,8 | 1855,64 | 1056,8 |
| | 15.35 | 1,1416598 | 13,86 | 337,4 | 1982,56 | 1105,3 |
| | 11.35 | 1,3945030 | 24,80 | 355,5 | 2088,92 | 1145,6 |
| | 8. 2 | 1,7093014 | 51,20 | 393,5 | 2312,21 | 1227,5 |
| | 5.10 | 2,0910018 | 123,32 | 418,0 | 2456,17 | 1278,8 |
| | 4.25 | 2,2269164 | 168,62 | 433,0 | 2544,31 | 1310,0 |
| 4 janvier 1862. LUMIÈRE BLEUE. | Fusion de l'arg. | | » | 253,9 | 1504,24 | 916,0 |
| | 90? | 0 | 1 | 320,0 | 1895,68 | 1072,3 |
| | 66.20 | 0,0763074 | 1,19 | 336,0 | 1990,46 | 1108,6 |
| | 53.00 | 0,1953028 | 1,57 | 341,3 | 2021,86 | 1120,1 |
| | 47.30 | 0,2647382 | 1,84 | 347,0 | 2055,63 | 1133,1 |
| | 35.25 | 0,4738658 | 2,98 | 364,8 | 2161,08 | 1172,3 |
| | 30.37 | 0,5858532 | 3,85 | 372,5 | 2206,69 | 1189,1 |
| | 26.22 | 0,7047562 | 5,07 | 381,5 | 2260,00 | 1208,6 |
| | 23.20 | 0,8044346 | 6,37 | 392,0 | 2322,21 | 1231,1 |
| | 19.55 | 0,9353754 | 8,62 | 399,0 | 2363,68 | 1245,9 |
| | 16.17 | 1,1040504 | 12,71 | 415,0 | 2458,46 | 1279,7 |
| | 12.35 | 1,3236376 | 21,07 | 433,6 | 2568,65 | 1318,3 |
| | 10.15 | 1,4994356 | 31,58 | 453,0 | 2683,57 | 1358,0 |
| | 9 | 1,6113352 | 40,86 | 456,0 | 2701,35 | 1364,1 |

On voit, d'après ce tableau, que, malgré des irrégularités plus grandes qu'avec les rayons rouges, les différences entre les logarithmes des intensités lumineuses sont sensiblement proportionnelles aux différences des températures des valeurs calculées. Les rapports qui donnent la valeur $b$ sont en moyenne :

Pour les rayons verts. . . . . 0,00591,
Pour les rayons bleus. . . . . 0,00715.

D'après cela, une formule analogue à la formule (1) donnerait les intensités lumineuses dans les deux séries d'expériences précédentes; mais il faudrait prendre alors pour $\theta$ un nombre un peu supérieur à 500°, car ce n'est qu'après cette température que les corps incandescents commencent à émettre des rayons d'une réfrangibilité plus grande que le rouge.

On peut reconnaître que la valeur du rapport $b$ augmente avec la ré-

frangibilité; il est vrai qu'il faudrait un plus grand nombre d'observations pour avoir les valeurs exactes de $b$ relatives aux différents rayons lumineux à l'aide desquels on a opéré; mais si l'on admet les valeurs précédentes, et que l'on remarque que les rayons lumineux ne sont pas simples; si l'on cherche en outre quels sont les rayons moyens émis par les verres rouges, verts et bleus, les premiers verres donnant passage aux rayons lumineux compris entre les raies B et C du spectre solaire, les seconds, la partie de l'image prismatique voisine de E, et les verres bleus celle comprise entre F et G, on aurait :

| TEINTE DES RAYONS qui traversent les verres colorés. | VALEUR DE $b$. | LONGUEUR D'ONDE en millionièmes de millimètre. $\lambda$ (1). | PRODUIT $b\lambda$. |
|---|---|---|---|
| Rouges..... | 0,00501 | 670 | 3,357 |
| Verts..... | 0,00591 | 526 | 3,109 |
| Bleus..... | 0,00715 | 460 | 3,289 |

ce qui montrerait, si des expériences ultérieures viennent confirmer ce qui précède, que les valeurs de $b$ seraient sensiblement en raison inverse de $\lambda$, c'est-à-dire des longueurs d'onde des rayons lumineux.

Mais doit-on admettre cette conclusion, ou bien les différences que l'on observe entre les valeurs de $b$ ne proviennent-elles pas d'une autre cause et surtout de ce que l'on a admis que $a$ était constant? Si le pouvoir émissif des corps varie non-seulement pour les rayons de diverses couleurs, mais encore avec la température, la valeur de $b$ pourrait rester constante, et alors ce serait le coefficient $a$ qui varierait.

En effet, si l'on compare les valeurs de ces coefficients constants à celles du coefficient $a$ qui règle la vitesse du refroidissement dans le vide, dans la formule

$$V = ma^{\theta}\ (a^{t} - 1),$$

on trouve, d'après Dulong et Petit,

$$a = 1,0077.$$

En donnant la même forme à la formule de l'émission lumineuse des rayons rouges moyens, on aurait

(1) On vera dans le livre suivant quelles sont les longueurs d'onde des différents rayons colorés.

$$I = A\left(10^{b(T-\theta)} - 1\right)$$

et comme $b = 0,00501$, en simplifiant il viendrait

$$I = A\left(1,01160^{(T-\theta)} - 1\right),$$

c'est-à-dire que le coefficient qu'il faut élever à la puissance $T - \theta$ pour avoir l'intensité lumineuse du rouge moyen est un peu supérieur au coefficient trouvé par Dulong et Petit pour exprimer la vitesse du refroidissement des corps.

Pour les rayons verts, cette constante serait. . . 1,01371,
Pour les rayons bleus . . . . . 1,01660.

Si dans le refroidissement des corps au milieu d'une enceinte absolument vide le coefficient $a$ est une constante absolue, comme Dulong et Petit l'ont supposé, alors, comme on vient de le voir, les valeurs trouvées pour la lumière seraient un peu supérieures. Mais les expériences calorifiques n'ayant pas dépassé 240°, on peut se demander si à des températures plus élevées cette constante ne subirait pas des changements. Il est probable qu'il en est ainsi, et que la valeur de $a$ pour la chaleur, dépendant de la qualité des rayons émis, à des températures très-élevées devrait arriver à être comprise entre les limites que l'on a trouvées pour les rayons rouges.

Il est permis de supposer, vu l'identité d'origine de la chaleur et de la lumière, ainsi que des lois qui règlent la marche des rayons lumineux et calorifiques, que la loi d'émission est la même; mais il faudrait pouvoir tenir compte des changements qui ont lieu dans les différentes conditions physiques des corps au moment de cette émission. Ces recherches n'ayant donné que les changements observés dans l'intensité lumineuse, on doit se borner actuellement à considérer les formules citées plus haut comme représentant empiriquement et d'une manière suffisamment exacte les résultats des expériences.

### § 3. *Intensité des rayons différemment réfrangibles émis par les corps incandescents. Intensité totale de la lumière émise.*

Lorsque la température d'un corps solide opaque incandescent s'élève, non-seulement l'intensité d'un rayon d'une réfrangibilité déterminée augmente, mais encore il vient s'ajouter de nouveaux rayons

plus réfrangibles à ceux qui existent déjà; si ce corps est gazeux, alors la régularité du phénomène peut être en défaut par suite d'effets dont on parlera dans le livre suivant.

Quand on étudie à l'aide de la réfraction l'étendue du spectre produit par un corps comme le platine, la chaux, la magnésie, placé à côté du pyromètre thermo-électrique, on reconnaît que si les rayons visibles commencent à être émis un peu avant 500°, à 600° l'image prismatique s'étend presque jusque vers la région où se trouve la raie noire F du spectre solaire, et il faut aller jusqu'à fusion de l'or ou près de 1100° pour que cette image atteigne l'extrémité correspondante à la raie H, qui termine le violet visible du spectre. Ensuite, à une température plus élevée viennent s'ajouter des rayons encore plus réfrangibles, qui ne seraient accusés que par des actions chimiques ou phosphorescentes.

Il doit y avoir une relation entre la température du corps rayonnant et la réfrangibilité maximum des rayons émis, comme il y a une relation entre cette même température et l'accroissement d'intensité d'un rayon d'une réfrangibilité déterminée et ainsi qu'on l'a vu dans le paragraphe précédent; mais la difficulté des expériences, vu la faible intensité des rayons dont on veut déterminer le commencement de l'émission, et l'intensité plus forte des rayons voisins n'a pas permis de résoudre la question.

Quelques recherches ont été faites à l'aide d'un fil de platine rendu incandescent par un courant électrique, source de chaleur et de lumière que l'on peut aisément maintenir constante.

M. Draper (1) a cherché à comparer l'intensité de la lumière émise par un fil de platine incandescent placé dans l'air, ainsi que l'intensité de la chaleur rayonnante émise, et cela depuis l'instant où le fil devient rouge jusqu'aux températures les plus élevées. Pour déterminer dans chaque cas la température du fil, il a évalué la dilatation de ce fil; en supposant le coefficient de dilatation constant, il en a conclu la température. En somme, l'appareil forme lui-même un pyromètre en platine, et dès lors l'inégalité de dilatation de ce métal donne lieu, dans les températures élevées, aux mêmes incertitudes que celles auxquelles on est conduit avec les pyromètres ordinaires.

Voici néanmoins quels sont les résultats qu'il a donnés et qui sont relatifs à la quantité de chaleur émanée du fil, à la quantité de lumière

(1) *Philosophical magasine*, t. 30, p. 345; 1847.

déterminée par la méthode des ombres, et à l'extension plus ou moins grande du spectre lumineux. On doit remarquer que lorsque l'incandescence du fil de platine a lieu dans l'air, ce gaz refroidit très-rapidement le fil, et l'on n'est pas certain que la surface de ce fil et la partie centrale soient au même instant à la même température. On verra plus loin quels sont les effets qui me portent à émettre cette opinion.

| INTENSITÉ de la chaleur émise. | TEMPÉRATURE centigrade du fil de platine incandescent (par la dilatation du platine). | INTENSITÉ de la lumière émise. | ÉTENDUE du spectre lumineux donné par le platine incandescent. |
|---|---|---|---|
| » | 525 | » | Le rouge apparaît. |
| 0,87 | 527 | » | |
| 1,10 | 590 | » | On voit dans le spectre depuis le rouge jusque à une espace correspondant à la raie E dans le vert. |
| » | 600 | » | La limite du spectre s'étend jusqu'entre E et F. |
| 1,50 | 655 | » | |
| 1,80 | 718 | » | La limite du spectre s'étend jusqu'entre F et G. |
| 2,20 | 782 | » | La limite du spectre s'étend jusqu'entre G et H, près de G. |
| 2,80 | 846 | » | |
| 3,70 | 910 | » | |
| 5,00 | 974 | » | |
| 6,80 | 1038 | 0,34 | |
| 8,60 | 1100 | 0,62 | |
| 10,00 | 1166 | 1,73 | La limite du spectre s'étend jusqu'en H. |
| 12,50 | 1230 | 2,92 | |
| 15,50 | 1293 | 4,40 | |
| » | 1357 | 7,24 | |
| » | 1421 | 12,34 | |

M. Zöllner (1), dans un travail fait sur le même sujet, s'est proposé de rechercher les lois du dégagement de la lumière dans des fils de platine rendus incandescents par un courant électrique et de comparer l'action lumineuse à l'effet calorifique produit. Il s'est servi d'un photomètre d'une disposition particulière, fondé sur les effets de la double réfraction. Les deux lumières à comparer sont toutes deux polarisées à

(1) *Photometrische Untersuchungen*, etc.; Basel, 1859.

angle droit, de sorte qu'avec un même prisme de Nicol, lors du mouvement de rotation de ce dernier, si l'une des lumières augmente d'intensité, l'autre diminue, et l'on est certain, dans l'intervalle d'un quart de révolution, d'arriver à une position qui donne l'égalité des deux images lumineuses; seulement, les lumières éclairant des verres dépolis, l'on a le pouvoir éclairant de la surface totale des sources lumineuses, et non pas l'intensité d'une même étendue de ces sources comme en opérant au moyen du photomètre décrit antérieurement page 75. Il a déduit l'effet calorifique de la loi bien connue en vertu de laquelle la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la résistance à la conductibilité du fil parcouru par le courant et au carré de la quantité d'électricité qui passe pendant un temps donné.

Il a établi par l'expérience qu'en opérant avec des fils de diamètres différents, pour des degrés égaux d'incandescence la même quantité de chaleur est cédée à l'enceinte et ne dépend pas des diamètres des fils. Il a attribué les différences obtenues dans les séries d'observations au pouvoir refroidissant des extrémités des électrodes entre lesquelles les fils sont fixés. Mais il ne lui a pas été possible de trouver une relation simple entre l'intensité du courant électrique et le dégagement de chaleur et de lumière; les fils de platine étant placés dans l'air, une partie de la chaleur se communiquait par contact aux particules gazeuses environnantes.

J'ai suivi le même mode d'expérimentation, comme on va le voir, mais je n'ai pas cru devoir déduire l'action calorifique de l'intensité du courant et de la résistance du fil; j'ai déterminé directement, par expérience, l'intensité lumineuse du fil métallique parcouru par un courant électrique et placé dans le vide, ainsi que la quantité de chaleur émise pendant l'unité de temps au moyen d'une pile thermo-électrique.

L'appareil qui a servi à ces observations est représenté fig. 4; il se compose d'une cloche N reposant sur la platine d'une machine pneumatique et munie de trois tubulures E, F, N. Par la tubulure supérieure N, ainsi que par une des tubulures latérales E, on fait pénétrer deux tiges en cuivre CD, AB, de gros diamètre, au moyen de boîtes à cuir; la seconde de ces tiges est recourbée en B*b*, et à l'aide des pinces *a*, *b*, on peut tendre, dans l'intérieur de la cloche, un fil de platine *ab* de 7 à 8 centimètres de longueur, de façon à ce qu'il se maintienne dans une position verticale. Les deux tiges AB CD servent à transmettre un courant électrique au travers du fil *ab* de manière à porter

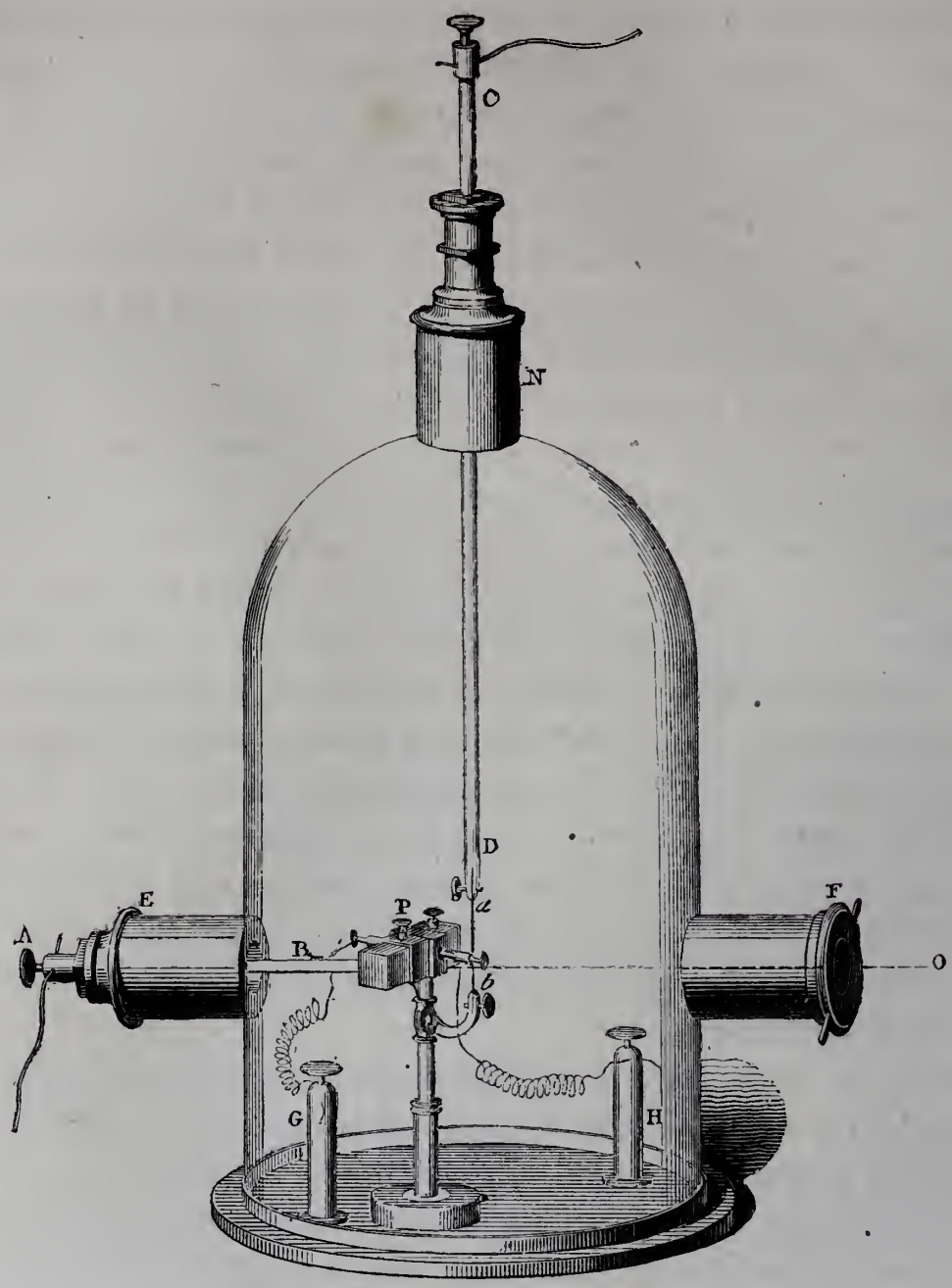



Fig. 4.

ce dernier au rouge, et le diamètre de ces tiges est tel (7 à 8 millimètres) qu'elles ne s'échauffent pas par l'action du courant, si ce n'est près des extrémités *a* et *b*.

Pour observer l'émission de lumière, on a fixé, devant la tubulure F une glace à faces parallèles, qui permet, dans la direction FO, de mesurer au moyen du photomètre représenté fig. 3, l'intensité des rayons lumineux qui émanent du fil incandescent. Pour étudier le rayonnement calorifique, on a placé auprès du fil une pile thermo-électrique P de 25 éléments, de manière que le fil soit éloigné de la face de la

pile de 4 à 5 centimètres au moins et de 8 à 10 au plus. Deux petites colonnes en cuivre G et H, qui traversent des morceaux d'ivoire fixés dans la platine de la machine pneumatique, mettent en relation les deux pôles de la pile thermo-électrique avec les deux extrémités d'un appareil rhéométrique placé à une certaine distance de la cloche.

A l'aide de la machine pneumatique, qui est en relation avec la platine, on peut raréfier l'air jusqu'à 1 millimètre de pression de mercure. Lorsqu'on échauffe le fil *ab* par le courant d'une pile, on fait passer ce même courant dans le fil d'une boussole des sinus, de façon à connaître l'intensité du courant depuis le moment où le fil s'échauffe jusqu'à l'instant où il fond par suite d'une incandescence trop vive. D'un autre côté, au moyen d'un rhéostat introduit dans le circuit et de la boussole des sinus, on peut déduire, dans chaque cas, la résistance du fil *ab* par rapport à celle du circuit total, en prenant pour unité la résistance du fil au commencement de l'expérience.

Quant au courant thermo-électrique développé dans la pile P et provenant de la différence de température des deux faces de cette pile, laquelle dépend de la chaleur émise directement par les différents points du fil *ab*, il passe dans le fil enroulé autour d'un magnétomètre, de sorte que les indications de ce dernier appareil donnent immédiatement l'intensité du courant électrique produit. On observait l'intensité du courant thermo-électrique, lorsque, le courant qui circule dans le fil *ab* étant constant, l'indication du magnétomètre était constante. Or, comme l'état stationnaire était atteint lorsque la pile thermo-électrique perdait par rayonnement dans l'enceinte autant qu'elle recevait du fil *ab*, et que, la différence de température des faces de la pile étant peu considérable, on pouvait admettre sensiblement que cette perte était proportionnelle à l'excès de leur température sur celle de l'air ambiant, dès lors les indications du magnétomètre qui exprimaient l'intensité du courant étant également proportionnelles aux différences de température des faces de la pile, ces indications donnaient la mesure de la quantité de chaleur émise dans l'unité de temps par le fil incandescent *ab*. Du reste, les résultats qui vont être indiqués plus loin servent à montrer qu'il en est sensiblement ainsi.

On pouvait craindre que, l'expérience ayant quelque durée, la température de la cloche vînt à s'élever peu à peu et que la régularité des indications du magnétomètre n'en fût atteinte; mais, ayant opéré en enveloppant la pile thermo-électrique P dans une seconde enveloppe

de métal poli, on n'a pas trouvé de différence appréciable, ce qui montre que l'élévation de température de l'enceinte se fait sentir à peu près de la même manière sur la cloche et dans la pile thermo-électrique, mais que les indications de cette dernière, pour une intensité déterminée d'un courant électrique qui passe dans *ab*, n'en sont pas très-notablement affectées.

Du reste, en face de la pile thermo-électrique P et de l'autre côté du fil incandescent *ab*, on a placé une lame de cuivre poli pour éviter toute émission calorifique des parois en verre de la cloche sur la pile.

Les résultats suivants ont été obtenus avec un fil de platine dont on a déterminé à chaque instant la résistance à la conductibilité en prenant, dans chaque cas, non-seulement la déviation donnée par la boussole des sinus quand le fil était dans le circuit, mais encore la déviation quand, toutes choses restant égales d'ailleurs, le fil de platine était placé hors du circuit. On obtenait aisément ce résultat en joignant les deux tiges A et C de l'appareil au moyen d'un fil de cuivre très-gros et très-court.

*Fil de platine de* $0^{mm}$, 215 *de diamètre. — Pile à acide nitrique de 4 couples.*

| ÉLÉMENTS RELATIFS AU FIL DE PLATINE PARCOURU PAR UN COURANT ÉLECTRIQUE. | | | | | DÉVIATION donnée par le magnétomètre ou intensité du courant thermo-électrique. | RAPPORT de la déviation M au produit P. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Angle de la boussole des sinus. | Sinus ou intensité du courant. | Sinus carré. | Résistance à la conductibilité du fil de platine. | Produit P de la résistance par le carré de l'intensité du courant. | | | |
| 20°.26′ | 3,4912 | 12,1883 | 0,0838 | 1,0214 | 11,3 | 11,063 | |
| 24.10 | 4,0939 | 16,7600 | 0,0990 | 1,6592 | 19,1 | 11,518 | Le fil de platine commence à rougir. |
| 26.50 | 4,5139 | 10,3760 | 0,1320 | 2,6896 | 31,0 | 11,626 | |
| 28.40 | 4,7997 | 23,0370 | 0,1550 | 3,5707 | 37,8 | 10,586 | |
| 33. 1 | 5,4488 | 29,6900 | 0,1787 | 5,3056 | 58,9 | 11,101 | |
| 37.30 | 6,0876 | 37,0590 | 0,1988 | 6,6675 | 87,0 | 13,048 | |
| 40.53 | 6,5452 | 42,8400 | 0,2125 | 9,1035 | 104,5 | 11,479 | |
| 45.25 | 7,1223 | 50,7270 | 0,2505 | 12,7071 | 134,0 | 10,624 | Quand le magnétomètre marque 139, le fil de platine fond. |

On voit, d'après cela, que les nombres qui représentent l'intensité du courant thermo-électrique sont sensiblement proportionnels au produit du carré de l'intensité du courant traversant le fil de platine par la résistance à la conductibilité de ce fil. Or, si l'on remarque que la quantité de chaleur développée à chaque instant dans le fil est précisément proportionnelle à ce produit, on doit en conclure que les intensités du courant thermo-électrique données par la pile thermo-électrique sont directement proportionnelles aux quantités de chaleur qui sont dégagées dans le fil de platine incandescent pendant l'unité de temps, mais pourvu que ce dernier fil soit placé dans le vide.

Ainsi l'on peut considérer l'intensité du courant thermo-électrique comme indiquant la quantité de chaleur développée par un courant électrique, pendant l'unité de temps, dans le fil de platine placé dans le vide; en évaluant donc cette intensité quand le courant électrique varie, puis, d'un autre côté, en déterminant, à l'aide du photomètre l'intensité lumineuse des rayons d'une réfrangibilité déterminée, des rayons rouges par exemple, on peut comparer l'émission de chaleur avec l'émission de la lumière rouge.

La lumière qui émane du fil traverse une plaque de verre à faces parallèles et est absorbée en faible proportion par cet écran; mais les rapports des quantités de lumière émises restent les mêmes quand le fil est plus ou moins incandescent.

On a vu, dans le paragraphe précédent, que la loi d'émission de la lumière homogène par le platine était assez régulière pour que l'on pût déduire la température de ce corps de l'intensité de la lumière émise, pourvu que certaines circonstances relatives à la source lumineuse fussent déterminées à l'avance. D'après cela, il semble que l'on puisse avoir à chaque instant la température du fil de platine. Mais il faut admettre alors que tous les points du fil incandescent ont simultanément la même température à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui n'est probablement pas; il est possible, au contraire, que les points à l'intérieur du fil aient une température plus élevée que celle de la surface qui rayonne. Le nombre que l'on détermine de cette manière doit donc se rapporter à la surface extérieure du fil. Ce qui tend à le faire croire, c'est que si l'on cherche, en graduant l'intensité du courant électrique qui traverse un fil métallique d'argent ou d'or, quelle est l'intensité lumineuse à l'instant de la fusion, au lieu de déduire de cette donnée la température de fusion de ces métaux, on arrive à des valeurs trop faibles, comme

je m'en suis assuré. Il est donc probable que pour le platine il en est également ainsi. D'après cela, le nombre auquel on est conduit par ce moyen pour déterminer la température de fusion du platine doit être inférieur à celui qu'on devrait avoir.

Si l'on compare seulement la quantité de chaleur M, émise pendant l'unité de temps, à l'intensité de la lumière émise par les rayons de couleur homogène, on reconnaît qu'à partir de la limite de 480 à 490°, à laquelle les rayons lumineux commencent à être émis, l'intensité lumineuse des rayons croît beaucoup plus rapidement que la quantité de chaleur, sans qu'il y ait aucune loi simple qui lie ces deux quantités l'une à l'autre. Entre les limites des expériences, si l'on nomme $m$ la quantité de chaleur émise au moment où le corps devient lumineux, on aurait sensiblement :

$$I = B(M - m)^3,$$

B étant un coefficient constant. D'après les résultats des expériences, on aurait $\log.\frac{1}{B} = 5,42379$, et l'on trouve qu'au delà de 500° l'intensité lumineuse des rayons rouges croîtrait presque aussi rapidement que le cube de la quantité de chaleur émise. Il est évident que si l'on pouvait estimer la quantité totale de la lumière émise, cette augmentation serait plus rapide encore, puisque à mesure que la température s'élève de nouveaux rayons lumineux s'ajoutent à ceux qui sont émis à une température plus basse.

S'il est possible de comparer les intensités de la lumière émise à différentes températures par un corps incandescent, alors que l'on ne s'attache qu'aux rayons de même réfrangibilité, on ne peut plus effectuer cette comparaison quand on veut déterminer la quantité totale de lumière émise, car cette lumière change de nuance à mesure que la température s'élève. Entre 500° et 550°, le corps incandescent est rouge très-sombre, puis aux rayons rouges s'ajoutent des rayons orangés et jaunes quand la température augmente; vers 916°, à la fusion de l'argent, la teinte est jaunâtre et elle devient plus blanche près de la fusion de l'or. Cependant, entre certaines limites, de 800° à 1100°, en mettant un verre jaune très-clair devant la lampe qui sert de source lumineuse de comparaison, on peut jusqu'à un certain point comparer entre elles les intensités lumineuses du platine incandescent placé au milieu du tube en terre ou en porcelaine échauffé; les résultats obtenus laissent toujours de l'indécision en raison du changement de nuance des

rayons émis, mais néanmoins j'en citerai quelques-uns pour montrer que depuis le rouge naissant l'intensité lumineuse croît beaucoup plus vite que lorsqu'on opère à l'aide des rayons d'une seule réfrangibilité, surtout dans les environs de 500°.

Les résultats suivants ont été obtenus en portant au rouge une lame de platine placée dans le tube de l'appareil representé fig. 2, page 72, et en mesurant la température au moyen du pyromètre thermo-électrique :

| | PHOTOMÈTRE. | | | MAGNÉTOMÈTRE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Angle mesuré sur le photomètre. | Log. I ou logarithme de l'intensité lumineuse, | Intensité lumineuse I. | Déviation observée. | Déviation par rapport à celle qui a lieu à 100°. | Température. |
| Expérience du 26 mai 1861. (Comparaison de toute la lumière émise par une lame de platine incandescente.) Verre jaune clair devant le photomètre. Résultats moyens entre les observations faites pendant l'élévation et pendant l'abaissement de la température. | 1°25' | 0,7862016 | 6,11 | 161,84 | 1112,46 | 744,7 |
| | 5.15 | 1,9228576 | 82,72 | 212,60 | 1376,85 | 862,0 |
| | 16.50 | 2,9235632 | 838,62 | 255,05 | 1657,13 | 978,4 |
| | 35.15 | 3,5225702 | 3331,00 | 290,32 | 1881,27 | 1066,7 |
| | 50.50 | 3,7789530 | 6011,10 | 316,64 | 2051,95 | 1131,6 |
| | 90 | 4 | 10000 | 326,62 | 2116,50 | 1155,6 |
| Expérience du 30 mai 1862. (Idem.) | 1.53 | 1,0282613 | 10,67 | 176,27 | 1142,23 | 758,4 |
| | 4.41 | 1,8224840 | 66,45 | 206,92 | 1340,80 | 846,6 |
| | 8.54 | 2,3798974 | 239,83 | 235,93 | 1528,83 | 926,0 |
| | 22,06 | 3,1511304 | 1416,20 | 270,80 | 1754,78 | 1017,5 |
| | 35,08 | 3,5198817 | 3310,40 | 295,23 | 1913,09 | 1079,2 |

Les intensités lumineuses n'ont pas été observées avec le photomètre disposé ainsi qu'on l'a dit plus haut; on a fait varier l'intensité de la lumière de la lampe au moyen des prismes mobiles de Nicol, et l'on a reçu en totalité, dans l'autre lunette, la lumière émise par le corps incandescent. Dans ce cas, le plus petit angle mesuré sur le cercle divisé correspond à la plus faible intensité lumineuse, et l'angle de 90° au maximum que peut comporter l'appareil. On a opéré dans chaque cas

à mesure que la température du fourneau s'élevait et lorsqu'elle descendait, puis on a pris la moyenne des températures pour des déviations égales dans le photomètre.

On voit que les rapports entre les différences des logarithmes des intensités lumineuses et les différences des températures sont plus variables que dans les expériences faites antérieurement avec des rayons homogènes. Il est facile d'en comprendre le motif : comme à partir de 500° des rayons de différentes réfrangibilités s'ajoutent à mesure que la température s'élève, si pour chaque réfrangibilité la loi d'émission indiquée plus haut a lieu, l'intensité lumineuse totale, qui résulte de la réunion de tous les rayons, doit augmenter d'abord très-vite à mesure qu'il s'ajoute plus de rayons, et ensuite plus lentement.

Une formule de la forme

$$I = a\left(e^{f(T-500)} - 1\right)$$

devrait donc représenter l'intensité lumineuse, $f(T-500)$ étant relative aux rayons de toute réfrangibilité qui peuvent être émis.

On a vu qu'avec des rayons simples on avait sensiblement $f(T-500) = b(T-500)$. On pourrait donner plusieurs termes à cette fonction; si l'on se borne au premier terme, on a entre 800° et 1100° des valeurs très-peu différentes des nombres observés. En admettant cette même formule avec $b = 0{,}00764$, on trouverait, en moyenne, pour les deux expériences précédentes :

| | Valeur de log. $\frac{1}{a}$ | Valeur de $a$. |
|---|---|---|
| 1re expérience (26 mai) . . | 0,9188783 | 0,120537 |
| 2e — (30 mai) . . | 0,8847633 | 0,130388 |

En cherchant donc quelle est la quantité totale de lumière émise par un corps incandescent aux différentes températures comprises entre 500 et 1200° et représentant par 1 celle qui serait émise lors de la fusion d'argent à 916°, on aurait les nombres suivants entre 500 et 1200° :

| Température. | Intensité totale de la lumière émise. |
|---|---|
| 500°. . . . . | 0 |
| 600. . . . . | 0,0032 |
| 700. . . . . | 0,0217 |

| Température. | Intensité totale de la lumière émise. |
|---|---|
| 800. . . . . | 0,1291 |
| 900. . . . . | 0,7528 |
| 916 (fusion de l'argent). . . . . | 1 |
| 1000 . . . . . | 4,3748 |
| 1037 (fusion de l'or). . . . . | 8,3887 |
| 1100. . . . . | 25,4106 |
| 1157 (fusion du cuivre). . . . . | 69,2649 |
| 1200. . . . . | 146,9205 |

Si l'on admet que la loi indiquée plus haut se continue au delà de cette dernière limite, on aurait :

| | |
|---|---|
| à 1500. . . . . | 28900. . . |
| à 2000. . . . . | 191000000. . . |

Mais il est probable qu'au delà de 1200° l'intensité lumineuse ne croît plus suivant la même loi.

Ainsi, en représentant par l'unité l'intensité de la lumière émise au moment de la fusion de l'argent, par un corps tel que le platine ou un fragment de magnésie ou de chaux placé à côté, à 600° il n'y a environ que les 3 millièmes de cette intensité lumineuse; à 700° les 2 centièmes; à 800° le $\frac{1}{8}$ environ, et à 900° les $\frac{3}{4}$. Lors de la fusion de l'or l'intensité lumineuse par irradiation serait plus de 8 fois plus forte que lors de la fusion de l'argent, et lors de la fusion du cuivre 69 fois ; à 1200° cette intensité deviendrait 147 fois plus forte, à 1500°, dans cette hypothèse, près de 29000 fois, et à 2000°, limite des observations avec le charbon polaire positif d'une pile, comme on le verra à la fin de ce chapitre, 191 millions de fois; mais ces deux derniers nombres supposent que la loi d'accroissement de l'intensité lumineuse reste la même au delà de 1200°, ce qui n'est pas prouvé.

### § 4. *Comparaison des pouvoirs éclairants des différentes sources de lumière. Unité lumineuse. Photomètres divers.*

Si la lumière se trouvait uniformément répartie dans toute l'étendue d'une source lumineuse, il suffirait de connaître l'intensité d'une partie quelconque, c'est-à-dire l'éclat relatif à cette partie, ainsi que la surface de la source lumineuse, et le produit de ces deux quan-

tités donnerait la quantité de lumière émise. On pourrait alors se servir d'un photomètre analogue à celui qui a été décrit plus haut, page 75, et qui conduit très-simplement à cette détermination. Mais comme l'intensité lumineuse est variable dans les différents points, il faut se borner à chercher la somme totale de lumière reçue à une distance déterminée, c'est-à-dire l'éclairement communiqué à une surface d'une étendue donnée, lequel peut servir à mesurer les pouvoirs éclairants des différentes sources.

Dans l'un et l'autre cas un des points essentiels est le choix d'une unité lumineuse qui soit toujours identique à elle-même ; c'est une question qui a beaucoup occupé les physiciens et qui n'est pas encore résolue aujourd'hui. On se borne généralement à rapporter les quantités de lumière à celle qui serait donnée par une bougie stéarique brûlant en une heure 10 grammes de matière ou par une lampe Carcel brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée, mais plutôt à cette dernière source lumineuse. En effet, la lumière donnée par une bougie peut dépendre de la pureté de la matière avec laquelle elle est formée, de sa grosseur et des dimensions de la mèche ; ainsi dans les expériences de Peclet, faites il y a une trentaine d'années, le rapport de l'intensité lumineuse de la lampe Carcel à celle d'un bougie était 7, 5, tandis que maintenant avec les bougies dont on fait usage ce rapport est compris entre 8 et 9. Quant à l'huile de colza épurée, on peut toujours la considérer comme à peu près identique à elle-même, et c'est pour ce motif que la flamme de la lampe modérateur ou du bec Carcel avec une mèche de 30 mill. de diamètre brûlant 42 grammes d'huile à l'heure est généralement prise pour unité. Quand on opère avec une bougie ou une lampe qui brûlent un peu moins ou un peu plus de matière, comme entre certaines limites les quantités de lumière données par une même source sont sensiblement proportionnelles aux quantités de matière brûlée, on peut, par une proportion, trouver les intensités lumineuses qui seraient données par les nombres précédents.

Pour comparer les différents degrés de clarté, on s'en rapporte habituellement aux effets produits sur la vue, et quand cette comparaison a lieu entre deux surfaces éclairées dont l'intensité n'est pas très-forte, l'œil, dont la sensibilité est très-grande, peut assez bien juger des différences d'intensité. Dans la seconde partie de cet ouvrage il sera question des effets chimiques ou calorifiques de la lumière qui, dans certaines circonstances et pour les lumières de même composition,

peuvent servir de terme de comparaison aux intensités lumineuses.

Les premières expériences un peu précises sur la photométrie sont dues à Bouguer et datent de 1729, époque de la publication de son *Traité sur la gradation de la lumière,* dont il a été question dans les *Préliminaires,* page 2. Il compara les intensités lumineuses de deux lumières, par l'éclairement de deux surfaces juxtaposées et plaça les lumières à des distances inégales des écrans de façon à amener leur égalité d'illumination; le rapport des carrés des distances respectives des lumières aux écrans est celui des intensités lumineuses. Comme il a trouvé qu'une lumière qui est 64 fois plus forte qu'une autre peut faire disparaître celle-ci, la limite de sensibilité de son appareil est telle que l'on peut avoir les rapports des intensités à $\frac{1}{64}$ près. Masson a montré, comme on le verra dans le livre V, que cette limite pouvait être dépassée et que quelquefois elle pouvait être portée à $\frac{1}{120}$.

Rumford (1) a proposé une méthode très-commode et plus exacte que la précédente, et qui, convenablement employée, est une des plus sensibles dont on puisse se servir. Elle est fondée sur l'égalité des ombres projetées par l'interposition d'un corps opaque entre les deux lumières à comparer et un écran blanc éclairé en même temps par les deux lumières. Supposons qu'il s'agisse de comparer le pouvoir éclairant d'une lampe L et d'une bougie *l*, fig. 5 : devant l'écran en papier C D, dans une chambre obscure, on place une tige opaque AB, de forme cylindrique, et l'on dispose les deux lumières de manière à projeter sur l'écran deux ombres MN, *mn,* très-rapprochées l'une de l'autre, et de façon que l'inclinaison des rayons incidents *l* A *m*, L A M soit la même. On recule alors la flamme la plus vive L, ou l'on approche celle qui l'est moins, jusqu'à ce que les deux ombres paraissent de même intensité; si l'on remarque que l'ombre de chaque lumière est éclairée par l'autre lumière, et que le reste de l'écran reçoit la somme des clartés des deux lumières, on voit que l'égalité des ombres indique l'instant où chaque lumière donne la même clarté à une étendue de même surface de l'écran. Ce point atteint, le rapport du carré des distances des lumières L et *l* à l'écran donne le rapport des pouvoirs éclairants des lumières.

(1) *Philosoph. transactions,* t. LXXXIV, p. 67.

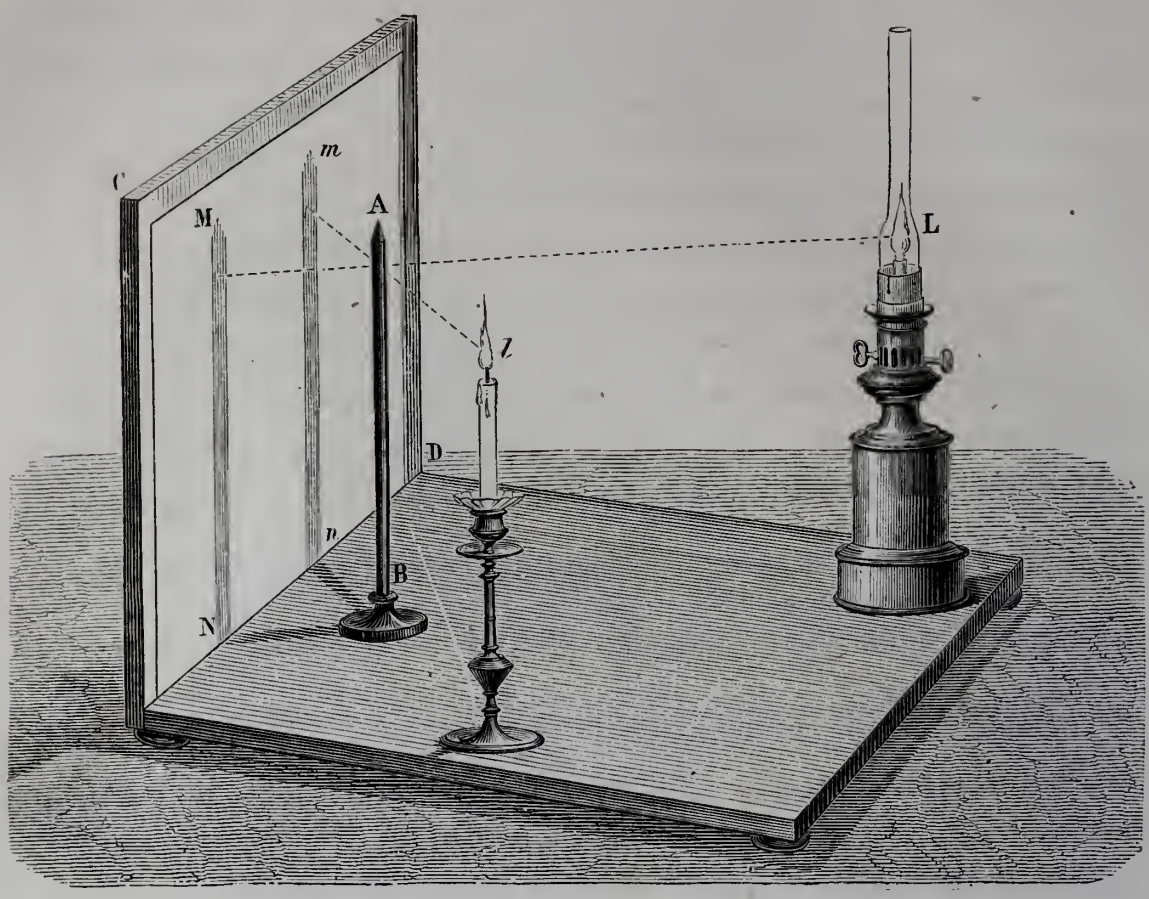



Fig. 5.

Cette méthode est très-sensible, pouvu que les lumières à comparer ne soient pas d'une étendue trop grande et trop rapprochées de l'écran et que les deux ombres soient amenées à être très-près l'une de l'autre ; il faut aussi qu'elles ne diffèrent pas beaucoup en couleur, car la différence de nuance des deux ombres est très-facile à saisir ; du reste, dans ce cas particulier, aucun des procédés photométriques ne peut donner des résultats précis. Les avantages de cette méthode, sa simplicité et la promptitude avec laquelle on opère la rendent très-souvent utile.

Elle a été modifiée comme il suit par M. Foucault, qui a disposé un appareil portatif servant à comparer plus facilement et plus exactement l'illumination des ombres projetées sur un écran transparent. L'appareil est representé fig. 6. Une boîte AMNB peut être ouverte à sa partie antérieure AB, et porte au fond MN une ouverture circulaire *ab* fermée avec un écran translucide. Cet écran est formé par deux lames de verre contenant entre elles une couche très-mince d'amidon obtenu par dépôt au moyen de la lévigation ; il permet d'observer par transpa-

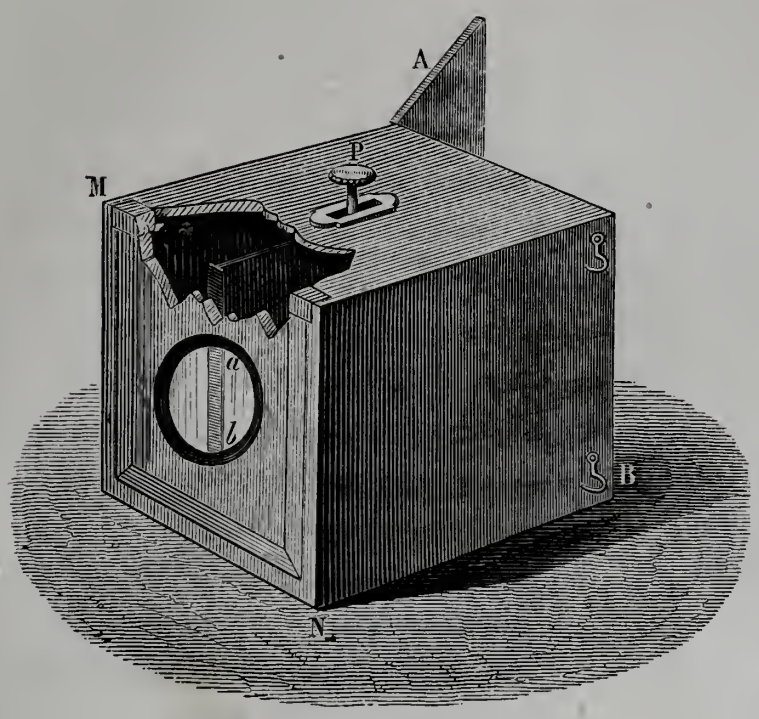



Fig 6.

rence l'illumination produite par les lumières à comparer que l'on place au de là de la partie ouverte AB.

Dans l'intérieur de la boîte se trouve une planchette ou une lame métallique qui, à l'aide d'un bouton P peut être approchée ou éloignée de l'écran *ab*. Cette planchette est destinée, comme la tige dans la méthode de Rumford, à donner deux ombres sur l'écran *ab*, au moyen des deux lumières à comparer, qui sont l'une à droite l'autre à gauche du prolongement du plan de la planchette, en avant de la boîte et au delà de AB.

Pour que ces deux ombres soient séparées par des bords très-tranchés, les deux côtés de la planchette intérieure, comme les parties intérieures de la boîte, sont garnis de drap noir; en outre, une lame plate métallique donne une certaine largeur au bord de la planchette qui regarde l'écran. On voit alors que si les deux lumières à comparer sont en avant, en faisant mouvoir le bouton P, on peut approcher ou éloigner les deux ombres qui se projettent sur l'écran *ab*; on peut donc faire qu'elles soient séparées par un espace plus sombre, ou bien que les deux images empiétant l'une sur l'autre, elles soient séparées par un espace plus clair, ou même qu'elles soient tangentes l'une à l'autre. C'est même en se plaçant de façon à rendre tangents les deux demi-cercles lumineux, que l'on peut arriver à rendre les deux surfaces également éclairées. Par ce moyen la comparaison des intensités lumineuses est facile et précise, et d'un autre côté l'œil n'est pas impressionné par un espace plus fortement éclairé autour des ombres, comme dans l'appareil simple de Rumford. On prend alors les distances des lumières à l'écran, et le rapport des carrés de ces distances donne celui des pouvoirs éclairants des deux sources lumineuses.

M. Bunsen a construit un photomètre dont la disposition est assez

simple; il est fondé sur le principe suivant : supposons une feuille de papier blanc portant une partie plus claire au milieu, comme une tache faite avec de l'acide stéarique ou avec de la cire; si cette feuille de papier est placée entre les deux lumières que l'on veut comparer, de manière que chacune des faces se trouve éclairée seulement par les faisceaux lumineux qui émanent de la source placée vis-à-vis d'elle, si les deux foyers éclairent également la feuille de papier, les deux faces devront présenter le même aspect. Dans ce cas, l'expérience indique la disparition à peu près complète de la tache; à ce moment, en effet, la quantité de lumière réfléchie par chacune des faces est égale à celle qui lui arrive par transmission.

La disposition représentée fig. 7 permet de comparer aisément les deux images de chaque côté de la feuille de papier. Cette feuille est placée dans un petit cadre en bois AB; MN et M'N' sont deux miroirs, formant une angle obtus divisé par le plan AB en deux parties égales. L'observateur placé à la partie antérieure voit donc par réflexion, de chaque côté, les deux faces du papier. Les deux lumières à comparer sont situées l'une à droite, l'autre à gauche de AB, et chaque face ne peut être éclairée que par une seule lumière; on fait varier les distances de ces lumières jusqu'à ce que la tache centrale disparaisse, et le rapport du carré des distances des lumières à l'écran AB donne le rapport des intensités lumineuses comme avec les photomètres précédents.

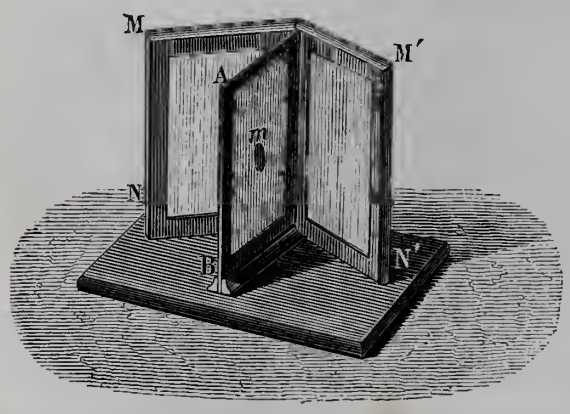


Fig. 7.

On a apporté quelques modifications à ce procédé, mais seulement au point de vue de la facilité avec laquelle on peut mesurer les distances des flammes aux faces de l'écran transparent.

Les phénomènes de la double réfraction, de la polarisation et des interférences peuvent être invoqués dans la comparaison des pouvoirs éclairants, et Arago a décrit plusieurs appareils permettant d'atteindre ce but; c'est à lui qu'on doit les principes des différentes méthodes photométriques fondées sur cette partie de l'optique (1). En

(1) Arago, *Œuvres diverses*, t. X, p. 196. *Comptes rend. de l'Acad.*, t. 20, 21 et 30.

général chaque série de recherches exige l'emploi d'un appareil disposé en vue de ces recherches, afin qu'il soit sensible entre les limites des intensités lumineuses que l'on veut comparer entre elles. Plusieurs physiciens ont donné des dispositions fondées sur les effets de double réfraction et de polarisation, mais il n'est pas nécessaire de les décrire pour le sujet dont il s'agit ici; il suffira d'indiquer, comme appareils disposés en vue de recherches spéciales, après les appareils d'Arago et de Babinet (1), le photomètre de M. Zöllner, dont il a déjà été question précédemment, page 88, et celui de M. Wild (2).

Le photomètre que j'ai décrit au commencement de ce chapitre, page 74, et qui est représenté fig. 3, pourrait être employé dans la comparaison de l'éclat de deux surfaces de même étendue des deux lumières, pourvu que la teinte de ces lumières fût peu différente. Ainsi, soit à chercher le rapport entre l'intensité des rayons rouges d'une lampe $L_r$ et celle d'une autre source $I_r$ : On vise la source $I_r$ avec la lunette droite A, et $L_r$ avec la lunette de côté B, puis l'on tourne le prisme mobile de la lunette droite avec l'alidade $a$ jusqu'à ce que l'égalité lumineuse soit établie. Si l'on appelle $a$ la fraction de lumière qui passe au travers de la lunette droite A et des verres colorés quand les prismes de Nicol sont parallèles, $\alpha$ étant l'angle compté depuis la position du croisement de ces prismes, et $b$ la portion de lumière qui traverse la lunette placée de côté B, on aura :

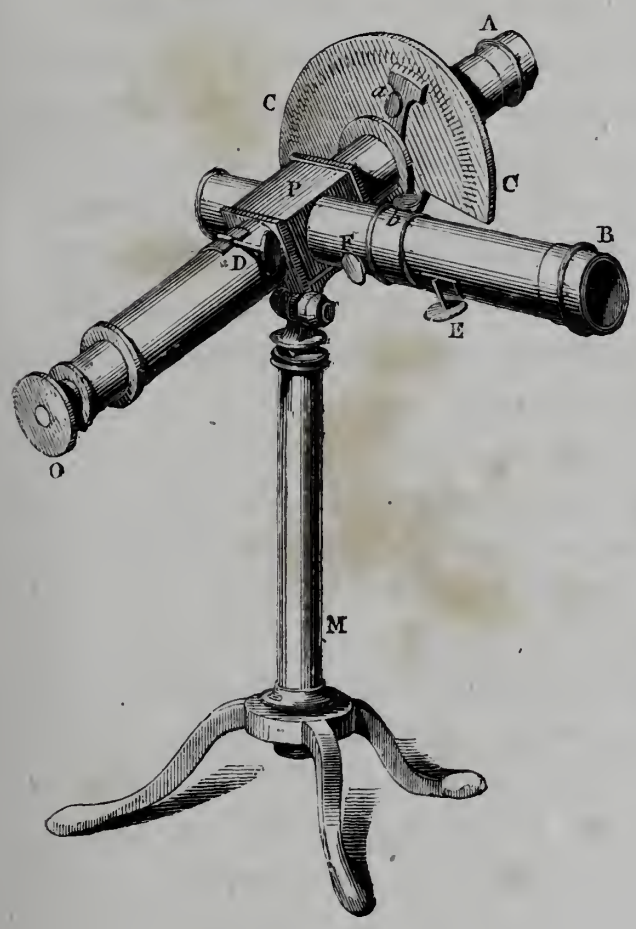


Fig. 3.

$$a\ I_r\ \sin^2\alpha = b\ L_r$$

(1) *Comptes rend. de l'Acad. des sciences*, t. 37, p. 774.
(2) *Ann. de Chimie et de physique*, 3e série, t. LXIX, p. 238, 183.

Si l'on change de place les sources I et L en visant L avec la lunette droite et I avec la lunette de côté, en appelant $\theta$ l'angle des prismes de Nicol nécessaire pour l'égalité lumineuse, on aura :

$$a\, L_r \sin^2\theta = b\, I_r.$$

Ces deux équations étant divisées termes à termes, il vient, en réduisant :

$$\frac{I_r}{L_r} = \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}.$$

Ainsi, ce rapport est indépendant des valeurs $a$ et $b$. Dans la plupart des expériences cette évaluation n'est pas nécessaire, et il suffit de comparer les lumières que l'on étudie à la même source lumineuse vue par le même côté du photomètre.

Les appareils dont il vient d'être question permettent de juger de l'égalité d'illumination de deux surfaces également éclairées avec une approximation qui varie de $\frac{1}{64}$ à $\frac{1}{120}$, mais pourvu que l'intensité lumineuse ne soit pas trop vive et que les lumières aient la même nuance. Quand les teintes sont différentes, ces méthodes cessent d'être précises, et l'on peut d'autant plus se tromper dans la comparaison des surfaces éclairées que les différences sont plus grandes ; on ne peut plus compter alors sur aucune évaluation exacte.

§ 5. *Lumière émise par les solides, les liquides et les gaz. Pouvoir éclairant des flammes : bougies, lampes, gaz d'éclairage, chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, lampe au magnésium, arc voltaïque.*

Si les corps deviennent lumineux à partir de la même limite de température, leur état physique peut influer beaucoup sur l'intensité de la lumière qu'ils émettent ; s'ils sont opaques et qu'ils restent solides pendant l'élévation de température, la quantité de lumière rayonnée, comme on l'a vu dans le § 3, est peu différente pour certains d'entre eux dans les mêmes conditions de température ; pour d'autres, qui se couvrent d'oxydes, comme le cuivre, on a vu que le pouvoir d'irradiation est moindre. Cependant, la composition de la lumière émise par les solides incandescents est la même et le spectre lumineux qu'ils donnent par réfraction est continu et sans apparences de raies noires ou brillantes (1).

(1) MM. J. Bahr et Bunsen ont trouvé dernièrement que l'erbine placée dans la flamme

Si les corps sont transparents, soit par eux-mêmes à l'état solide, soit en raison d'une couche d'oxyde dont ils se recouvrent, soit enfin par la fusion qu'ils éprouvent lorsqu'ils sont échauffés, leur pouvoir d'irradiation peut être beaucoup moindre. Ce résultat du reste est une conséquence de l'égalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant des corps à température égale; quand ceux-ci sont transparents, l'absorption lumineuse étant plus faible leur pouvoir émissif doit être moindre. Il résulte de là une différence très-grande dans l'intensité de la lumière émise par les corps solides ou liquides à égalité de température; mais avec les liquides comme avec les solides la réfraction donne une image prismatique continue.

Dans quelques circonstances l'intensité lumineuse paraît changer lors du changement d'état des corps. C'est à un effet de ce genre que l'on doit rapporter l'observation suivante, due à M. Gaudin : la silice a un très-faible pouvoir d'irradiation en raison de sa transparence, et placée dans la flamme d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène elle arrive à son point de fusion sans éclairer sensiblement; c'est au moment où elle fond qu'elle brille subitement avec vivacité. Pour faire aisément l'expérience, on présente à la flamme du chalumeau un fil de cristal de roche fondu préalablement en sphère à chaque extrémité; l'une des sphères étant dans la flamme, tout le fil reste obscur, mais au moment ou la sphère qui est au milieu de la flamme vient à fondre, celle-ci se trouve vivement illuminée, et la sphère qui est dans l'air brille également d'un grand éclat par un effet de réflexion lumineuse intérieure.

Arago (1) a montré que la lumière émise par tout corps incandescent solide ou liquide, même quand le corps est opaque et que sa surface n'est pas complétement polie, offre des traces de polarisation quand elle est émise sous un angle suffisamment petit, en sorte qu'en pénétrant dans son polariscope chromatique elle se décompose en faisceaux colorés. Les substances solides qu'il a ainsi étudiées sont le fer forgé et le platine, et comme liquides la fonte de fer et le verre en

d'un chalumeau donne par irradiation des rayons lumineux qui étant réfractés produisent un spectre discontinu à raies brillantes; si la substance ne donne aucune trace de volatilisation, ce serait le premier exemple d'un corps solide incandescent présentant un spectre discontinu. On reviendra sur ce sujet dans le livre suivant, à propos de l'analyse de la lumière. (*Ann. der Chemie und Pharmacie*, t. 137, p. 1, N^lle^ série, t. 61. — *Ann. de Chimie et de physique*, 4^e^ série, t. 9, page 484.)

(1) Arago, *Astronomie*, t. II, p. 102.

fusion. Quant aux gaz enflammés, comme le gaz d'éclairage, ils émettent des rayons qui sont à l'état naturel quel que soit l'angle d'émission. Ces effets, comme on l'a vu dans les *Préliminaires*, lui ont permis d'arriver à cette conclusion que la lumière émise par les bords du soleil étant à l'état naturel provient d'une atmosphère gazeuse et non pas d'une couche lumineuse solide ou liquide.

On peut conclure de ces résultats que la lumière émise par les solides et les liquides incandescents ne se trouve pas limitée à la surface extrême qui les termine, mais qu'elle provient d'une certaine profondeur au-dessous de cette surface, car c'est par la réfraction qu'elle éprouve quand elle est émise très-obliquement que les effet de polarisation deviennent sensibles. Si elle ne traversait pas une couche d'une certaine épaisseur, quoique très-petite elle n'offrirait aucune trace de polarisation.

Les gaz étant échauffés au-dessus de 500° deviennent lumineux comme les solides et les liquides. Les flammes en effet ne sont autres que des masses gazeuses portées à l'incandescence par suite de la combustion de certaines subtances avec l'oxygène ou avec un autre principe comburant.

Les flammes, comme les gaz, étant transparentes ne doivent pas être aussi lumineuses que les solides et les liquides, à température égale, et même en général plus la transparence est grande, moins est grande la quantité de lumière qu'elles donnent. On verra également dans le livre suivant que les images prismatiques que présente leur lumière sont discontinues et parcourues par des raies ou lignes brillantes, au lieu d'être continues comme celles données par les solides et les liquides incandescents. Mais dans ce chapitre, comme il n'est question que de l'intensité des effets produits, on doit seulement examiner comment les effets varient suivant la nature des matières volatilisées et incandescentes qu'elles renferment.

La flamme provenant de la combustion de l'hydrogène pur est très-peu lumineuse, car elle ne donne lieu qu'à la production d'un corps transparent, c'est-à-dire de la vapeur d'eau; mais si l'on plonge dans l'intérieur de cette flamme un corps opaque comme le platine, la chaux, la magnésie, aussitôt ce corps solide s'échauffe et donne une lumière très-vive.

Si l'hydrogène se trouve mélangé de gaz carbonés, la flamme qu'il produit dans l'air devient par elle-même flamme éclairante par suite de la présence de parcelles charbonneuses qui proviennent de la dé-

composition du gaz et qui brûlent en même temps que lui; si au contraire on a soin de mélanger le gaz avec de l'air atmosphérique avant de le faire brûler, afin que le carbone ne se trouve pas en excès au moment de la combustion, alors la flamme cesse d'être éclairante et sous ce rapport se trouve à peu près dans les mêmes conditions que la flamme du gaz hydrogène pur.

On peut faire une expérience très-démonstrative à l'aide d'un bec de gaz d'éclairage comme ceux qui servent dans les laboratoires et disposé comme le représente la fig. 8, de façon qu'à sa base l'arrivée du gaz combustible ait lieu par une petite ouverture centrale, et celle de l'air à la périphérie par une espace annulaire, dont on peut faire varier l'étendue depuis zéro jusqu'à une certaine limite. Quand il n'y a pas d'arrivée d'air, le gaz d'éclairage brûle en haut avec sa flamme brillante; en tournant l'anneau B, aussitôt l'air circule en même temps que le gaz, se mélange avec lui avant la combustion et la flamme cesse d'être éclairante.

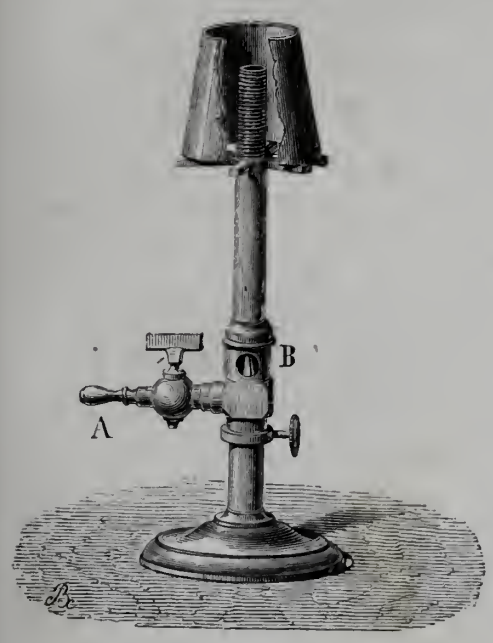


Fig. 8.

On peut même employer cette flamme bleuâtre pour répéter les expériences consistant à plonger dans son intérieur différentes matières. Si l'on forme au milieu d'un petit anneau de platine une perle de borax fondu, on peut maintenir le borax en fusion dans la flamme, qui n'acquiert qu'un faible pouvoir d'irradiation en raison de l'introduction de cette substance transparente, d'après ce qui a été expliqué plus haut; mais si l'on substitue au borax fondu un morceau de chaux ou de magnésie, aussitôt l'irradiation se produit avec une vive intensité. Dans ces différents cas la température ne change pas sensiblement, et même ne peut être qu'abaissée par la présence des corps plongés au milieu de la flamme.

Les flammes employées dans l'industrie doivent presque toutes leurs propriétés au pouvoir d'irradiation du carbone; leur intensité lumineuse dépend donc de la quantité qui s'y trouve et de leur température au moment de la combustion. Dans la combustion des chandelles, bou-

gies, huiles grasses et huiles essentielles comme dans celle des gaz provenant de la distillation de la houille, c'est l'irradiation du carbone qui se trouve à un moment donné dans la flamme qui lui donne son pouvoir éclairant; si dans l'éclairage avec les solides et les liquides on arrive à une action assez régulière, avec les gaz d'éclairage les effets sont très-variables en raison de l'influence de leur force élastique, de leur différence de composition et des circonstances diverses qui influent sur leur combustion. D'un autre côté, les températures n'étant pas les mêmes dans tous les points d'une flamme, non plus que les effets chimiques, le pouvoir éclairant n'est pas uniforme dans toutes les parties.

Examinons par exemple la flamme d'une bougie, ou d'un bec de gaz fig. 9. A la vue simple, on y reconnaît aisément quatre parties distinctes : 1° le bord inférieur de la flamme formant une belle couleur d'un bleu sombre; 2° un espace conique intérieur, moins transparent et moins lumineux que le reste de la flamme; 3° une zone de lumière plus éclatante que la précédente et environnant l'espace obscur; 4° une couche mince et peu lumineuse entourant les parties précédentes, et dans laquelle se trouve le maximum de chaleur.

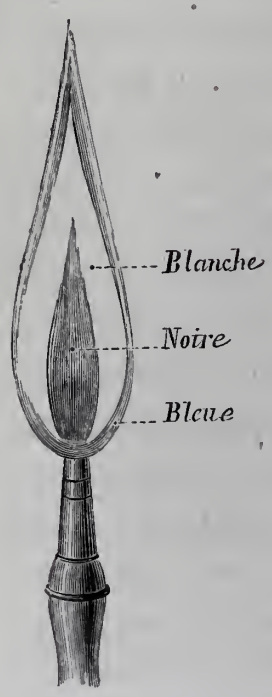


Fig. 9.

Dans la flamme de la lampe à gaz oxygène et hydrogène, c'est-à-dire du chalumeau à gaz hydrogène, ces différentes enveloppes ne sont pas aussi visibles à cause de la rapidité de la combustion; mais pour les observer il suffit de plonger transversalement dans la flamme un fil fin de platine, qui dans chacune des enveloppes devient d'autant plus lumineux que la température est plus élevée. Si le fil est placé, par exemple, à un ou deux millimètres immédiatement au-dessus de la partie visible de la flamme, il devient rouge blanc, au point par conséquent où il n'existe pas de lumière et où se trouve le maximum de chaleur. On obtient le même effet avec la flamme d'une lampe à alcool.

Pour mieux juger encore de l'éclat de la lumière accusée par chacune des parties ou plutôt des enveloppes d'une flamme d'une bougie ou d'une chandelle, on se sert d'un morceau de toile métallique formée de fils de laiton ayant 100 fils par centimètre carré, de manière à lui donner la forme verticale de la partie de la flamme située au-dessus de

la mèche, et on l'introduit dans la flamme de haut en bas en l'implantant dans la mèche au moyen de deux fils. On voit que la partie en contact de la pièce plongée dans la faible flamme extérieure rougit et s'oxyde fortement; la partie contiguë et correspondant à la surface très-lumineuse se recouvre d'une couche épaisse de charbon dont le contour a la forme d'un pain de sucre. Au dedans de cette limite la tôle est noircie et indique l'espace occupé par les gaz et les vapeurs inflammables qui s'échappent par la mèche. Le maximum de chaleur se trouve dans la partie invisible de la flamme, et la plus grande précipitation de charbon a lieu à la surface lumineuse.

On vient de voir que la présence du charbon en ignition explique les différentes apparences des diverses parties d'une flamme; dans la flamme activée par le chalumeau, le point où la chaleur est la plus grande est le centre de la flamme bleue où la combustion est la plus complète.

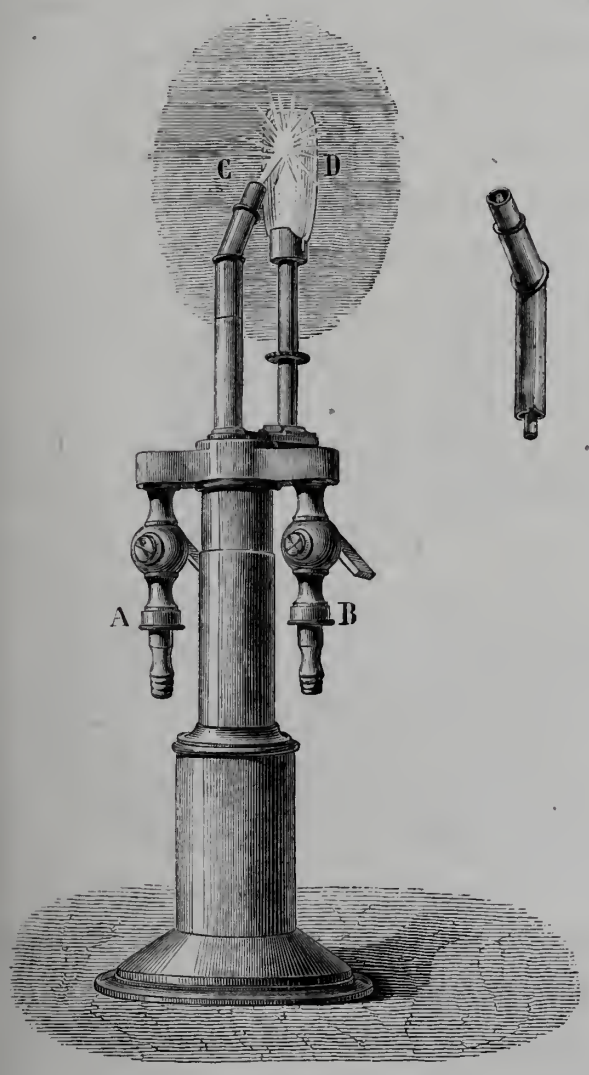


Fig. 10.

La lumière obtenue au moyen du mélange des gaz oxygène et hydrogène dont un jet enflammé échauffe jusqu'à l'incandescence un morceau de chaux donne un exemple d'une source lumineuse due à l'irradiation d'un corps solide autre que le carbone, lequel est placé dans une flamme peu éclairante mais dont la température est très-élevée.

L'appareil représenté fig 10 donne une disposition employée pour atteindre ce but. A et B sont deux robinets destinés à recevoir des tubes en caoutchouc; l'un livre passage au gaz oxygène conservé dans un sac en caoutchouc, et qui sort à l'aide d'un poids placé sur le sac,

l'autre est mis en communication avec un conduit de gaz d'éclairage; les deux gaz sortent par le chalumeau C. Le tube qui se termine en C et dont une section est représentée à côté de l'appareil, est formé de deux parties; l'une centrale, de 5 mill. de diamètre amène l'oxygène; l'autre, annulaire, de 10 mill. de diamètre, conduit le gaz d'éclairage : de sorte que le mélange détonant ne peut se former que près de l'orifice C. Des toiles métalliques sont placées dans les deux tubes de façon à éviter toute explosion à l'intérieur de l'appareil, dans le cas où par des diminutions de pression les gaz viendraient à passer d'un tube dans l'autre par l'orifice C. Ce système de tubes C est mobile et peut tourner ou s'élever de façon à diriger le jet enflammé sur un morceau de chaux ou de magnésie D.

Pour opérer, on commence par ouvrir le robinet du gaz d'éclairage, puis ensuite on fait arriver l'oxygène : la flamme est très-peu lumineuse; mais quand elle a échauffé une certaine étendue d'un morceau de chaux ou de magnésie D, placé sur un support latéral, aussitôt la partie frappée par le jet devient éblouissante et éclaire l'espace situé en avant de l'appareil.

Cette source lumineuse est assez riche en rayons jaunes et rouges, et ne renferme pas les rayons les plus réfrangibles bleus et violets aussi abondamment que la lumière au magnésium ou la lumière émise par l'arc voltaïque dont on va parler plus loin. Mais la facilité avec laquelle on manœuvre l'appareil, quand on peut disposer du gaz d'éclairage, fait qu'on l'utilise fréquemment.

J'ai fait quelques déterminations des quantités de lumière données dans l'appareil précédent par un fragment de chaux incandescent comparativement avec la quantité de lumière émanée d'une lampe Carcel brûlant 42 gr. d'huile à l'heure, et j'ai obtenu les résultats suivants : en ouvrant au maximum le robinet du gaz hydrogène d'éclairage, le débit était de 3 litres $\frac{1}{2}$ par minute, soit 210 litres par heure. On a alors chargé le sac de gaz oxygène contenant plus de 100 litres, avec un poids de 40 kilogr, et l'on a ouvert le robinet qui donnait issue au gaz de façon à obtenir le maximum de lumière estimée avec le photomètre représenté fig. 6, page 101; ce photomètre, dans ces conditions, a montré que cette source lumineuse ne dépassait pas celle de 20 becs Carcel; comme celle-ci vaut de 8 à 9 bougies, en admettant le premier nombre on voit que l'appareil précédent a donné une quantité de lumière pouvant aller au maximum à 160 ou 180 bougies. Cette in-

tensité peut varier, on le pense bien, avec les dimensions de l'appareil et le débit des gaz; elle peut même être beaucoup moindre.

La présence d'une matière solide et fixe autre que la chaux, et qui est produite dans la flamme elle-même au moment de la combustion, peut donner lieu à une vive production de lumière. Tel est le cas de la combustion du phosphore et du zinc dans l'oxygène; tel est aussi surtout le cas de la combustion du magnésium dans l'air et dans l'oxygène. Dans cette dernière circonstance il se forme de la magnésie qui étant un corps solide, opaque et infusible, donne le maximum d'éclat à la flamme; comme en outre la température due à la combustion du métal est très-élevée, la lumière émise est très-blanche.

Pour faire brûler facilement le magnésium, on a disposé des appareils portant le nom de lampes au magnésium, dans lesquels un mouvement d'horlogerie fait avancer un fil de magnésium au fur et à mesure de sa combustion à une de ses extrémités. La disposition de la lampe représentée fig. 11, est due à MM. Grant et Salomon. La lumière est produite par la combustion dans l'air d'un fil ou d'une lamelle de magnésium à l'extrémité du tube P *q*; un réflecteur est disposé de façon à renvoyer d'un même côté la lumière émise. Le cylindre P C contient le mouvement d'horlogerie, qui guidant le fil de magnésium au travers du tube métallique P *q* le fait avancer en avant du réflecteur; l'extrémité *q* est sensiblement au foyer de ce réflecteur, de sorte que si le fil est enflammé à cet orifice, toute la lumière émise dans la combustion du métal est projetée en avant. La clef C sert à monter le ressort, et le volant R règle la vitesse par laquelle l'appareil débite le fil; en *a* se trouve un bouton faisant arrêt.

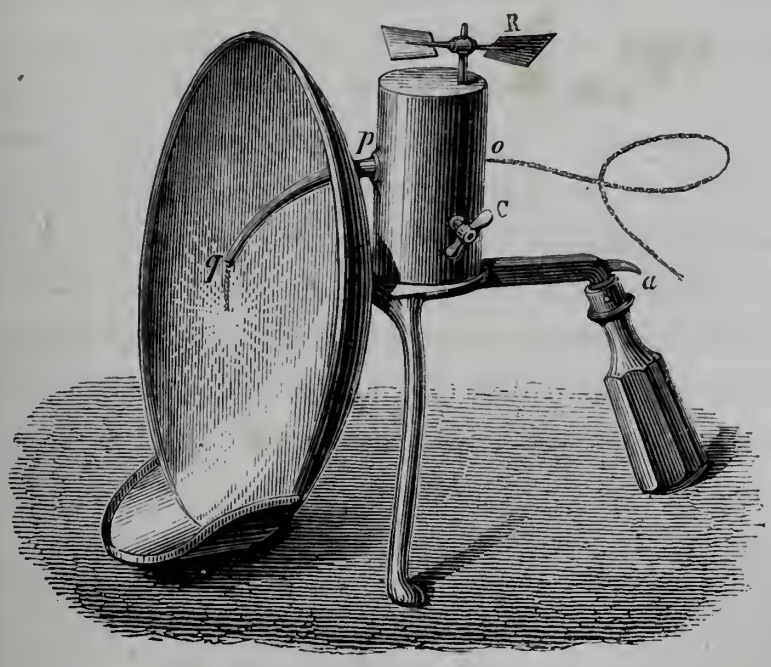


Fig. 11.

Pour mettre l'appareil en mouvement, aussitôt qu'on a enflammé

avec une allumette ou une bougie l'extrémité *q* du fil ou de la lame de magnésium, on prend la lampe à la main, on presse avec le doigt sur le bouton *a*, et tant que cette pression dure le mouvement fonctionne et le fil de magnésium avance à mesure que l'extrémité se consume. Quand on veut faire cesser l'effet lumineux, on arrête le mouvement, et la combustion s'arrête. La magnésie provenant de la combustion du magnésium tombe en avant, et des parcelles voltigent dans l'air; pour éviter cet effet on peut mettre un verre en avant du réflecteur.

Quelquefois on remarque que l'appareil cesse de fonctionner par rupture du fil; pour éviter cet inconvénient, au lieu d'un fil rond de magnésium, on façonne ce métal en lamelles plates et on en place deux l'une sur l'autre; on peut même avec deux tubes tels que P *q*, faire avancer deux couples de lames, ce qui augmente l'intensité lumineuse et permet de n'avoir pas d'interruption lors de la rupture d'une lame. M. F. Le Roux, qui a perfectionné cette lampe, a montré qu'on pouvait également y faire brûler un fil de magnésium contenant du zinc.

Les résultats suivants donnent l'intensité de la lumière émise lors de la combustion des fils ou des lames de magnésium dans l'air :

MM. Bunsen et Roscöe (1) ont trouvé qu'un fil de magnésium de 0,297 de diamètre, en brûlant, donne autant de lumière que 74 bougies stéariques. En 1 minute on brûle $0^{m},987$ de fil ou $0^{gr},1204$; si l'on cherche quel serait l'effet qui serait produit en une heure, on trouve qu'une combustion de $9^{gr},760$ de métal donnerait pendant ce même temps une lumière continue dont l'intensité serait la même que celle produite par 74 bougies stéariques.

M. Allard a fait à l'administration des phares de Paris plusieurs déterminations du pouvoir éclairant de lampes au magnésium; il a obtenu les résultats suivants, qu'il a eu l'obligeance de me communiquer :

| | Consommation des fils, en poids. | | Pouvoir éclairant moyen. |
|---|---|---|---|
| | par minute. | par heure. | |
| Lampe à 2 fils. | $0^{gr},176$ | $10^{gr},56$ | 22 becs carcel, ou 176 bougies |
| Lampe à 3 fils. | 0 ,454 | 27 ,26 | 43 — 344 — |

On suppose que le bec Carcel vaut, en nombre rond, 8 bougies; les lampes sont privées de réflecteurs, sans quoi les pouvoirs éclairants

(1) *Annal. der physik. etc.*, Poggendorf, t. 108, p. 266 — 1859. —

ne pourraient être comparés par la méthode des ombres et au moyen des indications données plus haut.

Les consommations ont été différentes, et pour comparer ces résultats entre eux, il faut les ramener à ce qu'ils seraient si la combustion d'un même poids de fil avait eu lieu. On trouve alors que si par heure, dans chaque cas, il n'y avait eu que 10 gr. de métal de brûlé, on aurait pour les intensités lumineuses :

| | |
|---|---|
| Ire expérience . . . . . | 102 bougies. |
| Lampe à 2 fils. . . . . | 177 |
| Lampe à 3 fils. . . . . | 126 |

Ces résultats ne s'éloignent pas beaucoup les uns des autres, si l'on remarque que les conditions dans lesquelles la combustion s'est opérée ne sont pas les mêmes. Ils montrent que 10 gr. de fil de magnésium brûlant dans l'air peuvent donner en une heure une lumière soutenue dont l'intensité est équivalente à celle de 100 à 180 bougies stéariques. Si l'on observe qu'une bougie stéarique brûle environ 10 gr. de matière à l'heure, on voit que pour un poids égal de matière consommée, et d'après les dernières évaluations, le magnésium donne environ 150 fois plus de lumière que l'acide stéarique.

Quant au prix de revient de la lumière au magnésium, il varie suivant le prix de fil ; on a d'abord livré ce métal à 1 fr. 20 le gramme ; actuellement on peut l'avoir à 0 fr. 45. Les rubans plats pèsent 0 gr. 8 par mètre, et dans les lampes il s'en déroule 0 mètre, 33 par minute. Quand la lampe est à deux ou à trois fils, la quantité de métal brûlé est double ou triple. D'après ces données, 10 gr. de magnésium coûteraient 4 fr. 50 : comme la quantité de lumière produite équivaudrait en moyenne à celle de 150 bougies, elle serait donc la même que celle qui serait donnée par 1 kil., 500 d'acide stéarique. Mettant le prix de la bougie à 2 fr. 70 le kil., on voit que le prix de revient de l'unité lumineuse dans la lampe au magnésium n'est pas actuellement beaucoup plus élevé que celui de la lumière donnée par les bougies stéariques.

Il est assez difficile de maintenir pendant longtemps la combustion des fils ou des lames de magnésium avec les appareils analogues au précédent ; aussi ne peut-on pas s'en servir pour des actions de quelque durée et dépassant plusieurs minutes. Comme la lumière émise dans la combustion du magnésium renferme en abondance des éléments très-réfrangibles, elle est éminemment propre pour les effets de phospho-

rescence et les actions chimiques ; on peut donc l'employer pour la photographie dans des endroits obscurs et dans des salles où l'éclairage efficace serait trop coûteux et même ne serait pas possible par tout autre moyen. Sous ce rapport la lampe au magnésium peut rendre de véritables services, quand on veut une vive lumière pendant quelques instants.

Lorsque la combustion de ce métal a lieu dans l'oxygène, l'intensité lumineuse produite est bien plus grande, M. Bunsen (1) a trouvé que dans ces conditions 0 gr., 1 de magnésium brûle avec un éclat comparable à celui de 110 bougies ; comme la surface du magnésium incandescent était de 6 à 8 fois plus petite que la surface brillante de la bougie, on peut donc dire que l'intensité de la lumière que dégage le métal incandescent brûlant dans l'oxygène est plus de 500 fois supérieur à celle de la lumière de la bougie.

La lumière de l'arc voltaïque est due à l'irradiation du carbone comme dans les sources provenant de la combustion des matières carbonacées ; mais ici l'élévation de température est due au passage de l'électricité au travers de la vapeur de carbone, ou de l'oxyde de carbone si l'appareil est placé dans l'air. Pour répéter l'expérience de Davy, qui a montré la première fois les effets puissants qu'on pouvait obtenir avec l'électricité, on dispose un appareil comme le représente la figure 24, qui sera donnée plus loin, livre V, et dans lequel deux tiges métalliques terminées par des pointes en charbon passent dans des douilles qui sont séparées au moyen d'un montant isolant en verre. Chacune de ces tiges est en contact avec une des extrémités d'une pile à acide azotique de 40 à 50 éléments. Au moment du contact des deux tiges en charbon, il se produit une très-grande élévation de température, et les pointes de charbon incandescentes donnent par irradiation une lumière d'une vivacité extraordinaire.

Cet arc s'éteint quand la combustion de chaque tige a diminué leur longueur de façon à ce que le courant ne puisse plus passer. Pour rendre l'arc fixe on se sert d'appareils que l'on nomme régulateurs de lumière électrique, et qui ont pour but de faire rapprocher les charbons au fur et à mesure que la combustion dans l'air et le transport du pôle + au pôle — diminue leur longueur. Il y en a de différents genres ; l'on représente ci-après, fig. 11 *bis*, le régulateur automatique imaginé par M. Serrin, et qui est adopté par l'administration des phares. Il se com-

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 36, p. 111.

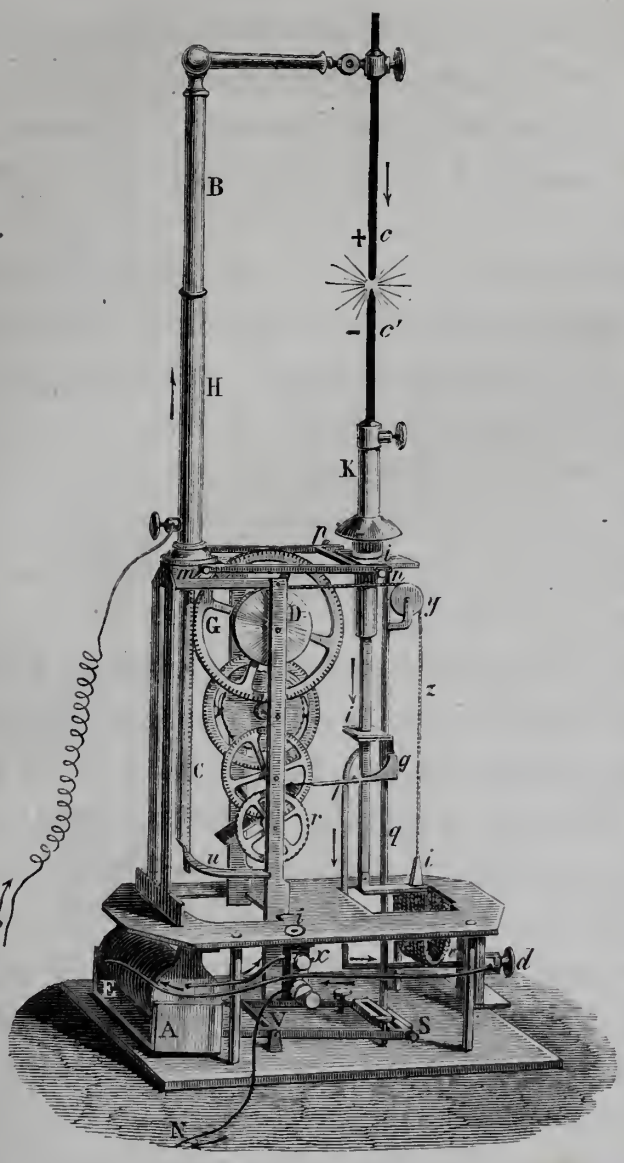



Fig. 11 *bis.*

pose essentiellement de deux mécanismes; l'un est affecté au rapprochement des charbons, l'autre à leur écart afin que l'appareil se mette en marche de lui-même (1).

Le premier mécanisme est composé des parties suivantes : la tige B, qui porte le charbon positif *c*, est taillée en crémaillère C; elle glisse dans la colonne H, qui lui sert de guide, et agit par son poids sur la roue dentée G, sur l'axe de laquelle est fixée une poulie D. Cette poulie en tournant de droite à gauche fait enrouler une chaîne *z*, qui passe sur une seconde poulie *y* et va s'attacher en *i* à la partie inférieure d'une tige rectangulaire; cette dernière tige en s'élevant fait monter la pièce K, qui supporte le charbon négatif *c'*, en sorte que celui-ci monte à mesure que le charbon positif s'abaisse. Le diamètre de la poulie D est à celui de la roue G dans un rapport correspondant à l'usure de chacun des charbons, de façon à maintenir le point lumineux à une hauteur invariable.

Quand cet appareil sert pour les machines magnéto-électriques, le courant électrique étant alternativement renversé, l'usure des charbons est à peu près la même, et les diamètres dont il est question sont peu différents. En réalité, l'action des courants d'air autour des charbons fait que le conducteur inferieur s'use un peu plus que le supérieur et cela dans le rapport de 108 à 100; les dimensions des diamètres des poulies doivent être dans ce rapport.

Le second mécanisme, ou système oscillant, constitue la partie carac-

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. 6, 7, 8 et 9; *Comptes rend. de l'Acad.*, t. 50.

téristique de cet appareil ; il se compose d'un parallélogramme articulé aux quatre angles dont l'un des côtés verticaux *q* est mobile et peut s'abaisser sous l'influence de son propre poids, ou s'élever sous la pression d'un ressort. Une armature en fer doux A et un électro-aimant E en déterminent tous les mouvements.

Voici comment le régulateur fonctionne : les deux charbons étant en contact, si le courant électrique entre par le fil P, il monte suivant HB au charbon positif et de là passe dans le charbon négatif, puis sur la pièce K, et se rend dans le sens des flèches jusqu'à la borne *d*, mais sans pénétrer dans le reste de l'appareil, toutes les pièces dans lesquelles passent le courant étant isolées par des pièces en ivoire *i i i i*. De *d* le courant est conduit par un fil isolé à l'électro-aimant E, d'où il sort pour se rendre à une borne *x* et de là à la pile par le fil N.

Aussitôt que le courant passe dans l'électro-aimant, l'armature A est soulevée et produit l'écart des charbons, car à cette armature est fixé un cadre de cuivre VS oscillant autour d'un axe horizontal V et lié au système oscillant q. Celui-ci s'abaissant, l'écart se produit, et en même temps la pièce *g*, terminée par une lame *t*, s'abaisse ; or celle-ci s'embrayant alors dans les dents d'une roue en rochet *r*, cette roue s'arrête et avec elle toutes les roues dentées et la crémaillère. Les charbons sont alors fixes, ce qui dure tant que le courant conserve assez d'intensité pour tenir l'armature A soulevée ; or, les charbons se brûlant, leur intervalle augmente et l'intensité du courant diminue de sorte que l'armature descend et la roue *r* désembraye. A ce moment les charbons se rapprochent, mais sans arriver au contact, car le courant électrique reprend aussitôt assez d'intensité pour soulever de nouveau l'armature et arrêter les charbons. Le rapprochement et l'écart sont donc réglés par l'appareil même.

M. J. Duboscq a construit un régulateur photo-électrique, répresenté fig. 11 *ter*, qui est fréquemment employé dans les expériences d'optique (1). Le mécanisme de ce régulateur a pour fonction de fixer la position de l'arc voltaïque en maintenant les deux charbons à une distance constante et en les rapprochant lorsque, par l'effet de la combustion, leur distance tend à devenir plus grande. Pour cela, un mouvement d'horlogerie placé dans le pied de l'appareil, tend à entraîner les deux

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, nouvelle série, t. 1, 2, 3. Becquerel, *Traité d'électricité* en 3 volumes, t. 3, p. 354.

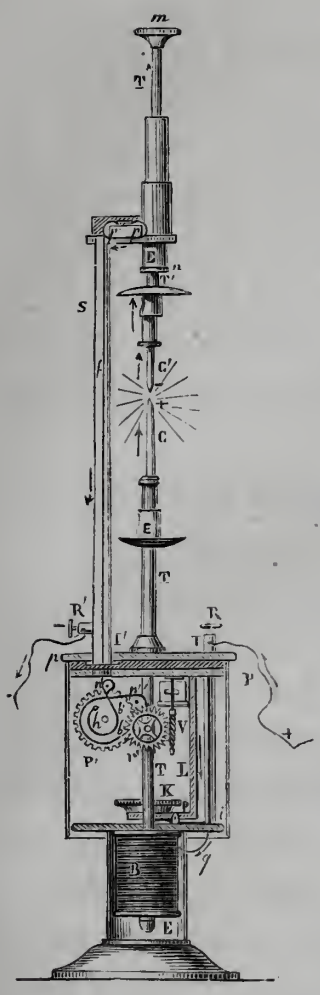


Fig. 11 *ter.*

supports des charbons T et T', soit à l'aide de deux chaînes *h* et *h'*, qui s'enroulent autour de deux gorges de poulies comme dans la figure, soit à l'aide de deux crémaillères comme dans une autre disposition de cet appareil.

A la base du régulateur se trouve un électro-aimant autour duquel circule le courant qui doit produire l'arc voltaïque. Cet électro-aimant peut attirer un contact en fer doux K, auquel est attaché un levier coudé PL, pivotant autour d'un axe horizontal et qui peut entraver le mouvement d'horlogerie dans sa marche. Si donc l'on fait arriver les charbons au contact et qu'on les éloigne de la quantité nécessaire pour que l'arc brille, le contact étant attiré, le mouvement d'horlogerie ne fonctionne pas et les charbons restant fixes diminuent de longueur par combustion; alors l'intensité du courant venant à diminuer, le contact est soulevé, le mouvement d'horlogerie fonctionne et les charbons se rapprochent jusqu'au moment où le courant reprend assez de force pour attirer de nouveau le contact. Quant aux diamètres des poulies, ils doivent être dans le rapport de l'usure des charbons polaires auxquels ils communiquent leur mouvement.

La lumière électrique obtenue avec l'arc voltaïque a une intensité qui dépend des circonstances de sa production; en effet, elle varie suivant la quantité d'électricité qui passe entre les charbons polaires et la pureté de ces charbons, car l'arc lumineux n'est produit que par le passage de l'électricité par l'intermédiaire des matières portées à l'incandescence; si donc le charbon n'est pas pur et renferme des silicates ou d'autres corps fusibles et volatils, ces matières étant conductrices et la quantité de chaleur produite dans une portion de circuit étant proportionelle au carré de l'intensité du courant et à la résistance à la conductibilité, l'intensité lumineuse doit diminuer. C'est pour ce motif que, toutes choses étant égales d'ailleurs, avec des charbons exempts de silicates l'intensité lumineuse de l'arc voltaïque est plus grande.

Quand on se sert de couples ordinaires à acide azotique pour former l'arc voltaïque et que le nombre de couples varie de 50 à 100, en éva-

luant la somme de lumière envoyée sur un écran placé à une certaine distance, on trouve que le pouvoir éclairant de l'arc varie de 400 à 1000 bougies. Quant à la dépense pour produire cette lumière, on peut, si on ne tient compte que des acides et du zinc usés dans la pile, la porter à 3 cent. par élément et par heure, et pour comprendre les frais accessoires, à 5 centimes. Ainsi 100 éléments coûteraient de 3 à 5 fr. à entretenir par heure, et la dépense de la lumière électrique comme équivalent lumineux serait à peu près dans les conditions de l'éclairage à l'huile de colza ordinaire (1).

Mais si l'on emploie les courants magnéto-électriques pour produire l'arc voltaïque, alors le prix de revient s'abaisse beaucoup. Voici les résultats de la comparaison faite à l'administration des phares dans les expériences sur l'emploi de la lumière électrique (2) avec une machine à 4 disques construite par la société l'Alliance et un régulateur de M. Serrin : Chaque disque portant 8 électro-aimants, et par conséquent la machine ayant 32 électro-aimants et 40 aimants permanents, on a trouvé que la machine à vapeur qui la fait tourner use en moyenne 10 kil. de charbon par heure, et que la quantité moyenne de lumière est équivalente à celle de 125 becs Carcel ou 1000 bougies. Avec les lampes à huile à mèches concentriques, utilisées auparavant dans les phares, la consommation pour un phare de premier ordre était environ de 120 gr. à l'heure, donnant 23 becs Carcel ou 184 bougies.

Quant au prix de revient de l'unité de lumière envoyée à l'horizon par les phares éclairés à la lumière électrique, il se compose non-seulement du prix du charbon brûlé dans le moteur, mais encore des dépenses accessoires, telles que payement des mécaniciens, usure des appareils, etc. En somme, en 1865, toute dépense comprise, il n'a pas atteint le $\frac{1}{7}$ de ce qu'il était autrefois avec l'huile. Si l'on n'a égard qu'à la dépense du charbon dans le moteur, alors ce prix est encore bien moindre.

On a déjà dit antérieurement que les sources lumineuses usitées dans les arts empruntent en général leur lumière à l'irradiation du carbone; tel est le cas des chandelles, bougies, lampes alimentées par les huiles grasses et essentielles diverses, ainsi que l'arc voltaïque formé entre des conducteurs en charbon; mais avec le chalumeau à gaz oxygène et

(1) Voir *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'ind.*, 2e série, t. 4, p. 530.

(2) Mémoire de M. L. Reynaud *sur le balisage et l'éclairage des côtes de France;* Paris, 1864, pag. 539 (*Moniteur universel* 21 mai 1866).

hydrogène, ou les appareils comme la lampe au magnésium, d'autres corps que le carbone sont incandescents. On a même utilisé il y a plusieurs années le pouvoir d'irradiation du platine en formant des réseaux avec des fils de ce métal qui étaient portés au rouge blanc à l'aide de la flamme très-peu éclairante du gaz hydrogène provenant de la décomposition de l'eau par le charbon.

Dans les premières flammes, qu'on peut appeler flammes charbonneuses, l'intensité lumineuse et en même temps la quantité de la lumière émise dépendent de la température, car plus la température est élevée, plus il y a proportionnellement de rayons très-réfrangibles et plus la lumière devient blanche; quand la combustion est incomplète et la température basse, la lumière devient rougeâtre. D'après M. Gaudin (1) ces différentes flammes peuvent être classées comme il suit par rapport à leur intensité lumineuse, en dehors de l'arc voltaïque bien entendu :

1° Les huiles essentielles brûlant avec l'oxygène avec production d'une fumée très-dense;

2° Le gaz hydrogène imprégné d'huiles essentielles brûlant avec l'oxygène;

3° L'alcool, l'éther ou le gaz de houille, mélangé d'huile essentielle, brûlant avec l'oxygène;

4° Le gaz hydrogène imprégné d'huile essentielle, et brûlant dans l'oxygène; belle lumière;

5° Le gaz de houille accompagné d'huile essentielle brûlant dans l'air;

6° Le gaz de houille brûlant dans l'air.

La blancheur de ces flammes suit celle des intensités et est plus grande dans les flammes dont les noms précèdent que dans celles dont les noms suivent.

Il est assez difficile de donner une évaluation de l'intensité lumineuse comparée des différentes sources qui viennent d'être citées, car cette évaluation dans chaque cas dépend d'une foule de circonstances, et ne doit être considérée que relative aux conditions de l'expérience elle-même.

Ainsi, lors de la combustion de l'huile grasse (huile de colza) dans une lampe Carcel ou modérateur, la quantité de lumière produite n'est pas exactement proportionelle à la quantité d'huile brûlée; l'effet peut dépendre de la hauteur de la mèche, de la position du verre et par

(1) Becquerel, *Traité de physique*, t. II, p. 110.

conséquent de la manière dont la combustion se produit. Cependant, cette source lumineuse quand la lampe est dite montée pour brûler à blanc est encore une des plus constantes que l'on puisse avoir.

Dans la combution du gaz l'intensité est bien autrement variable, puisqu'elle dépend non-seulement de la composition du gaz et surtout des matières carbonacées qu'il peut renfermer, mais encore de la disposition du bec, de sa construction, de la rapidité du courant d'air, de la température et de la pression du gaz à sa sortie. On ne peut donc pas donner des résultats même moyens, à moins de spécifier la forme du bec employé ainsi que la composition et la pression du gaz qui brûle.

Les résultats suivants ont été obtenus dans une série d'expériences faites il y a plusieurs années (1). Les premières colonnes du tableau renferment les résultats des expériences; la quatrième colonne, qui indique la consommation relative à l'intensité lumineuse correspondant à une bougie, renferme des nombres théoriques qui servent à estimer la dépense pour une consommation déterminée.

| SOURCES DE LUMIÈRE. | pouvoir éclairant. | Consommation en 1 heure. | Consommation par heure pour une lumière égale à une bougie stéarique. | Prix de l'équivalent de lumière égal à 100 bougies par heure. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | gr. | gr. | fr. | fr. |
| Chandelle de suif..... | 0,81 | 8,55 | 10,55 | 1,58 | à 1,50 le kilogr. |
| Bougie de cire..... | 0,92 | 7,60 | 8,26 | 4,63 | à 5,60 — |
| Bougie stéarique..... | 1 | 10,40 | 10,40 | 2,81 | à ,70 — |
| Huile de colza épurée. Lampe Carcel, mèche 7 lignes. | 3,53 | 17,66 | | | |
| Huile de colza épurée. — 9 — | 4,32 | 21,31 | | | |
| Huile de colza épurée. — 11 — | 5,73 | 29,33 | 5,10 | 0,77 | à 1,50 — |
| Huile de colza épurée. — 13 — | 7,11 | 37,02 | | | |
| Huile de colza épurée. (a) Nombre théorique par le calcul. | 8,23 | 42 | | | |
| Huile essentielle légère de schiste... | 10,14 | 45,81 | 4,52 | 0,55 | |
| Bec de gaz dit papillon..... | 7,60 | variable (b). | variable entre 15 et 25 litres. | variable. | Le prix de 1000 litres est de 15 cent. pour la ville de Paris et de 30 cent. pour les partic. |

(1) *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 2e série, t. 4, p. 534; 1857.

(*a*) Cette quantité se rapporte à une lampe Carcel brûlant à blanc et consommant 42 gr. d'huile à l'heure.

(*b*) Voir Peclet, *Traité de l'éclairage au gaz;* Robert d'Hurcourt, *Éclairage au gaz*, page 338; *Dictionnaire des arts et manufact., article Éclairage;* Audouin et Berard, *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. LXV; 1862.

On voit que le rapport du pouvoir éclairant d'une lampe Carcel brûlant 42 gr. d'huile à l'heure à celui d'une bougie stéarique brûlant 10 gr. 40 est de 8,23. Quant aux prix de revient des matières brûlées, il varie chaque année, de sorte que les nombres insérés dans les deux dernières colonnes doivent être calculés de nouveau quand ces prix viennent à changer.

M. F. Leblanc a eu l'obligeance de me communiquer les résultats suivants, qui se déduisent d'expériences faites pendant ces dernières années dans le service municipal de la ville de Paris :

Le pouvoir éclairant de la lampe Carcel brûlant 42 gr. d'huile à l'heure étant pris pour unité, les bougies stéariques ordinaires courtes de l'étoile brûlent 10 gr. 23 à l'heure et donnent un pouvoir éclairant de $\frac{1}{9}$ par rapport au précédent. Ainsi, d'après ces résultats, la lampe Carcel vaudrait 9 bougies. Plus haut on a donné le nombre 8,23; mais on a vu, page 98, que cette valeur pouvait subir des variations. On peut donc dire, en général, que la lampe Carcel brûlant 42 gr. d'huile à l'heure donne autant de lumière que 8 à 9 bougies stéariques.

L'huile de pétrole (valant 0,75 le kilog.) brûlée dans une lampe à mèche cylindrique et présentant une consommation de 49 gr. à l'heure, a donné un pouvoir éclairant de 1,78 par rapport à celui de la lampe Carcel.

Quant à la lumière du gaz d'éclairage, elle est fort variable, comme on l'a expliqué plus haut; mais dans un bec dit Bengel, de forme déterminée, en moyenne on admet que 25 litres de gaz donnent autant de lumière que 10 gr. d'huile de colza, de sorte qu'il faut consommer 105 litres de gaz avec ce bec pour avoir une lumière équivalente à celle de la lampe Carcel; avec les becs papillons cette dépense est bien plus grande.

D'après ces résultats et les prix de revient actuels des matières brûlées, si l'on prend pour unité de lumière celle qui correspond à 42 gr. d'huile de colza brûlée par heure, la dépense pour la même intensité lumineuse avec les différents modes d'éclairage dont il vient d'être question serait en centimes, par heure :

| | | cent. |
|---|---|---|
| Gaz d'éclairage | au prix de 15 cent. le mètre cube payé par la ville de Paris. . . . | 1,5 |
| | au prix de 30 cent. le mètre cube payé par les particuliers..... | 3 |
| Pétrole. . . . . | | 2 |

| | |
|---|---|
| Huile de colza | 6,5 |
| Bougie stéarique | 26 |

§ 6. — *Intensité de la lumière émise par les corps incandescents placés dans diverses sources calorifiques; évaluation approchée de leur température.*

On vient de parler dans le paragraphe précédent du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène et de l'arc voltaïque; mais les phénomènes d'irradiation peuvent permettre d'avoir une idée des températures qui se produisent dans ces puissantes sources calorifiques.

Si l'on pouvait toujours observer simultanément avec les différents corps que l'on étudie une même substance, comme le platine, la comparaison entre les effets obtenus serait facile; on le peut aisément jusqu'au point de fusion de ce métal, mais au delà cela n'est plus possible. On a bien vu que jusqu'à 1300° environ le platine, la chaux, la magnésie, le charbon, avaient sensiblement le même pouvoir d'irradiation. En est-il de même à des températures plus élevées? C'est ce que l'on ne peut affirmer; mais, en supposant que cette égalité subsiste, on peut avoir une idée des plus hautes températures que l'on puisse produire, et l'on va voir que ces températures ne sont pas aussi élevées qu'on l'avait supposé.

Afin de comparer entre elles les intensités lumineuses sans que l'on ait besoin à chaque expérience de déterminer, à l'aide du fourneau et du couple thermo-électrique, comme on la vu, page 72, la température correspondante à différentes intensités, j'ai reconnu qu'en visant avec la lunette droite du photomètre representé fig. 3 la partie la plus lumineuse de la flamme d'une lampe Carcel montée toujours de la même manière, ainsi que la partie la plus lumineuse de la flamme d'une bougie, on avait dans chaque expérience, et à différents jours d'intervalle, des nombres très-peu différents, et que l'on pouvait régler les déterminations faites avec la lampe placée de côté, pour qu'elles se rapportassent toutes à la même unité. Ainsi, lorsque l'on a pour les déviations du photomètre avec les verres rouges dont on s'est servi,

| | Angle mesuré sur le photomètre. | Log. I. |
|---|---|---|
| Partie la plus lumineuse de la flamme de la lampe | 8° 25′ | 1,6690902 |
| Partie la plus lumineuse de la flamme de la bougie stéarique | 10° 20′ | 1,4524782 |

on peut sensiblement appliquer la formule donnée précédemment page 82, et dans ces températures élevées on a

$$T = 925,21 + 199,44 \log. (I).$$

Il faut se rappeler en effet que l'on a démontré antérieurement que l'intensité de la lumière émise dans la flamme d'un bec de gaz était la même, à égalité de température, que dans un tube échauffé au milieu d'un fourneau.

Il est facile, au moyen des prismes de Nicol placés dans la lunette latérale du photomètre fig. 3, de ramener aux valeurs précédentes les intensités lumineuses de la lampe ou de la bougie, afin de se placer dans les mêmes conditions expérimentales.

Les appareils étant ainsi réglés, on a disposé un chalumeau à gaz hydrogène et oxygène, puis l'on s'est arrangé pour introduire dans la flamme l'extrémité d'une tige en platine, qui n'a pas tardé à entrer en fusion; on a visé à ce moment, au moyen du photomètre, sur la boule de platine en fusion, pour évaluer l'intensité lumineuse. On a opéré de même avec le fer, le cuivre rouge, puis on a substitué à ces tiges des fragments de chaux, de magnésie, d'alumine, et l'on a eu les résultats suivants :

| | MATIÈRES placées dans la flamme du chalumeau à gaz. | | PHOTOMÈTRE. Angle observé. | Logarithme de I. | Intensité lumineuse I. | TEMPÉRATURE calculée. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Expérience du 7 janvier 1862. RAYONS ROUGES. | Chaux vive. | D'abord | 1° 50' | 2,9485100 | 977,04 | 1513°,3 |
| | | Puis | 1. 40 | 3,0726702 | 1182,15 | 1538,0 |
| | Platine. | Avant la fusion | 3 | 2,5623996 | ..... | 1436,2 |
| | | Fond et bouillonne | 4.15 | 2,8121034 | ..... | 1486,1 |
| | | Maximum observé | 2 | 2,9143616 | ..... | 1506,4 |
| | Fer. Effets lumin. tr.-variables d'intensité. | Tige en fusion. | 4.10 | 2,2774334 | | » |
| | | Excès d'oxygène | 2.10 | » | » | » |
| | | Excès d'hydrog. | 5. 0 | » | » | » |
| | | Gouttes d'oxide. | 3. 0 | 2,5623996 | | » |
| | Cuivre rouge. | Inégalités très-grandes lors de la fusion (intensité moyenne) | 19.55 | 0,9353754 | 8,62 | » |
| | Quartz fondant | | 6.50 | 1,8490402 | 70,64 | » |
| | Alumine fondant et cristallisant | | 4.40 | 2,1792922 | 151,11 | » |
| | Magnésie | | 1.10 | 3,3824118 | 2412,20 | 1599,8 |

Les expériences suivantes ont été faites plusieurs mois après les précédentes avec un second photomètre analogue au premier, mais en prenant pour unité une autre intensité lumineuse ; on a d'abord visé directement sur les portions les plus lumineuses d'une lampe modérateur et sur celles d'une bougie ; on a eu :

| | Angle mesuré sur le photomètre. | Log. I. |
|---|---|---|
| Partie la plus lumineuse de la flamme de la lampe (rayons rouges). . . . . | 7° 54' | 1,7237450 |
| Partie la plus lumineuse de la flamme de la bougie stéarique . . . . . | 9° 47' | 1,5394964 |

En appliquant la même formule que précédemment, mais en tenant

compte de ces nouvelles intensités, on a pour la température l'expression

$$T = 911,07 + 199,44 \log. I.$$

On a eu ensuite :

| | MATIÈRES placées dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. | PHOTOMÈTRE. Angle observé. | Logarithme de I. | Intensité lumineuse I. | TEMPÉRATURE calculée. |
|---|---|---|---|---|---|
| Expériences de décembre 1862. | Chaux vive.... . ..... | 1°18' | 3,2884330 | » | 1566,9 |
| | Magnésie ..... | 1.19 | 3,2766000 | » | 1564,6 |
| | Platine..... | 2.22 | 2,7682170 | » | 1463,2 |
| | Palladium..... | 4.12 | 2,2705248 | » | 1364,0 |
| | Fer..... Effets lumineux variables; éclats par instants. | 5.44 | 2,0008810 | » | » |
| | Cuivre... Effets lumineux très-variables d'intensité. | 25.32 | 0,7309726 | » | » |

On voit, d'après ces résultats, que les corps transparents ou en fusion ne sont pas doués du même pouvoir d'irradiation; car la fusion du quartz et celle de l'alumine, quoique n'ayant pas lieu à la même température, ne sont pas bien éloignées l'une de l'autre, et cependant les intensités lumineuses de ces matières sont plus faibles que celle observée lors de la fusion du fer.

La première série d'expérience a donné pour la chaux et la magnésie des intensités lumineuses différentes; mais il est probable que ce résultat tient aux inégalités de température présentées par le jet de flamme au commencement et à la fin de l'opération, car dans la seconde série d'expériences la lumière émise a été trouvée sensiblement égale avec les deux substances.

En ce qui concerne la fusion des métaux, et en particulier du platine, la température à laquelle la fusion a lieu ne peut être déterminée avec exactitude; car, outre la difficulté d'évaluer exactement l'intensité de la lumière émise par une masse métallique aussi petite, il est possible qu'au moment de la fusion le pouvoir d'irradiation ne reste pas le même que lorsque le corps est solide; si elle devient plus petite, on est alors conduit à une température un peu trop basse. On peut néanmoins, en admettant que la loi d'émission lumineuse reste la même qu'entre 1000° et 1200°, indiquer les limites probables entre lesquelles les points de fusion ont lieu.

Si les températures de fusion des métaux sont difficiles à préciser, il est encore plus difficile d'indiquer exactement la limite de température à laquelle on peut arriver avec la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène; les corps qui sont plongés dans la flamme, ou même les points très-lumineux que présentent les cylindres en chaux ou en magnésie sur lesquels on projette le jet gazeux enflammé, s'échauffent, mais rayonnent, et ce n'est que quand ils reçoivent autant qu'ils perdent dans un temps donné que l'équilibre de température est établi; or, sous ce rapport il faudrait donc un corps opaque d'une ténuité extrême pour se rapprocher de la limite de température à laquelle on peut parvenir. Les résultats précédents obtenus avec la chaux et la magnésie donnent entre 1560° et 1600° pour cette limite, qui doit donc être un peu trop faible; cependant cette valeur représente la température que prennent ces corps au moment où on les observe.

Lorsqu'on fait usage de la méthode photométrique employée ici pour l'évaluation des hautes températures, il faut admettre que la loi d'émission lumineuse qui s'applique jusqu'à 1300° se continue encore au delà; c'est là le côté hypothétique de cette méthode optique. Du reste, quel que soit l'effet physique que l'on emploie pour comparer les températures, on est toujours obligé de faire une supposition du même genre, et même en se servant de la dilatation d'un gaz, il faudrait savoir si la loi de dilatation reste toujours uniforme à des températures aussi élevées.

Une autre difficulté se présente dans les évaluations photométriques : déjà, dans les expériences précédentes, on arrivait à des angles de 2° et de 1°, et comme à peine si l'on peut faire la détermination de ces quantités à cinq minutes de degrés près, l'erreur expérimentale que l'on commet devient de plus en plus forte. En supposant un angle de 1° dé-

terminé sur le cercle du photomètre, une différence de 5 minutes correspond à une différence de 15° à 16° de température centigrade. Pour atténuer cette erreur en observant des intensités lumineuses plus vives encore, il faut employer des écrans colorés absorbant la lumière; et comme on opère toujours avec des rayons d'une réfrangibilité déterminée, on ne craint pas de changer d'une manière sensible la nuance des rayons transmis. On s'est servi dans les expériences dont les résultats sont indiquées ci-après pour les rayons rouges de verres colorés par le protoxyde de cuivre et de la réunion d'un verre bleu de cobalt et d'un verre rouge, réunion, comme on le sait, qui ne laisse passer que le rouge extrême du spectre. La quantité de lumière qui passait au travers du premier verre rouge était les 0,0724 de la lumière rouge incidente; celle qui traversait l'écran mixte bleu et rouge était les 0,00706. D'un autre côté, à l'aide des prismes de Nicol ordinaires placés dans la lunette latérale du photomètre représenté fig. 3, on peut changer l'intensité de la lumière type suivant des rapports déterminés, et étendre encore les limites des effets à comparer.

La source physique qui a paru donner à un corps lumineux l'irradiation la plus vive est l'arc voltaïque produit entre deux cônes de charbon placés dans l'air. On a déjà vu que le charbon de cornue placé dans la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène donne, par incandescence, une lumière peu différente de celle d'un fragment de magnésie et de chaux; la seule différence que l'on observe serait plutôt en faveur du charbon dans un jet de gaz où l'oxygène est légèrement en excès. Le charbon se comportant comme un corps opaque incandescent, on a dirigé la lunette du photomètre sur les charbons polaires d'un arc voltaïque formé dans l'air au moyen d'une pile de 80 éléments à acide nitrique de moyenne dimension. L'éclat du charbon positif l'emportait beaucoup sur celui du charbon négatif. Après avoir placé la partie du bord de l'image de ce charbon où la lumière était la plus vive, au milieu du champ de la lunette, on a comparé la lumière rouge qui traversait le système à celle de la lumière de la source de comparaison vue de côté; on a eu en moyenne :

1° Avec le verre rouge (déviation mesurée dans le photomètre)..0°, 43

2° Avec le système des verres rouges et bleus. . . . . 1°,53

Si l'on cherche quel serait l'angle qui serait observé si l'on n'interposait aucun verre coloré, on trouve, d'après les pouvoirs absorbants de ces écrans, 11′ 35″ et 9′ 40″, c'est-à dire un nombre qui en moyenne

est un peu supérieur à 10 minutes de degrés. Comme les premières observations peuvent être en erreur de 5 minutes, le dernier nombre peut l'être de $\frac{1}{10}$ de sa valeur totale, ce qui correspond à une différence de 18° ou 20° de température centigrade.

En admettant pour limite cet angle de 10 minutes, et en supposant que la loi d'émission de la lumière reste la même que celle du platine ou de la magnésie, on trouve que la température observée serait de 1970°, et en tout cas ne dépasserait pas 2000°.

Il est possible que l'étincelle électrique donne une température plus élevée que celle de l'arc voltaïque; mais quant à présent je n'ai pu la déterminer au moyen des effets d'irradiation, vu son peu de durée. En tout cas, je ne pense pas que l'on s'éloigne beaucoup de la limite précédente.

On peut réunir dans le tableau suivant les températures les plus élevées que l'on obtient dans les foyers ordinaires ainsi qu'avec le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène et au moyen de l'arc voltaïque, ces températures étant évaluées à l'aide des méthodes décrites dans cet ouvrage :

| CHANGEMENTS D'ÉTAT. | INTENSITÉ du courant thermo-électrique ou degré pyrométrique du couple thermo-électrique platine-palladium. | TEMPÉRATURE centigrade. |
|---|---|---|
| Ébullition du cadmium | 1060,0 | 720,0 |
| — du zinc | 1445,0 | 891,0 |
| Fusion de l'argent | 1504,2 | 916,0 |
| — de l'or | 1805,1 | 1037,0 |
| — du cuivre rouge | 2120,0 | 1157,0 |
| — du fer (non carburé) | » | entre 1350 et 1400° |
| — du palladium | » | entre 1360 et 1380 |
| — du platine | » | entre 1460 et 1480 |
| Arc voltaïque; charbon polaire positif | » | limite supérieure 2000° |

# LIVRE IV.

## ANALYSE DE LA LUMIÈRE PAR RÉFRACTION.

## CHAPITRE PREMIER.

### Sources lumineuses d'origine météorique.

§ 1. *Spectre coloré; raies du spectre solaire et des spectres stellaires.*

Lorsqu'on réfracte à travers un prisme un faisceau de rayons solaires provenant d'une ouverture longitudinale très-étroite faite au volet de la chambre noire et de façon que l'arête du prisme soit parallèle à la fente, si l'on examine directement au travers du prisme le spectre lumineux produit par réfraction, ou bien si l'on reçoit sur un écran l'image produite par le faisceau lumineux dispersé en interposant une lentille de convergence de 40 à 60 cent. de foyer sur la route des rayons lumineux après leur sortie du prisme, de façon que l'écran soit sensiblement au foyer de l'image de l'ouverture par rapport à la lentille, et que la réfraction ait lieu pour les rayons moyens au minimum de la déviation, le spectre solaire, au lieu de former une image continue dans laquelle les couleurs passent insensiblement de l'une à l'autre, paraît traversé par des lignes noires parallèles à l'arête du prisme et plus ou moins nombreuses suivant les parties du spectre, lignes qui sont toujours les mêmes et qui ne varient entre elles que de distance quand on emploie divers prismes.

Ce phénomène ne peut être vu en employant un faisceau lumineux d'une certaine largeur; c'est ce qui explique comment depuis Newton, à qui l'on doit la découverte de la décomposition de la lumière par réfraction, et pendant plus d'un siècle, il est resté ignoré des physiciens.

Wollaston, (1) en 1802, est le premier qui signala quelques-unes des raies du spectre solaire ; mais c'est à Fraünhofer (2) que l'on doit une analyse précise de ce phénomène, qui lui a permis de fixer d'une manière exacte les indices de réfraction des différentes substances par rapport à des rayons de réfrangibilité bien déterminée ; le travail remarquable de Fraünhofer a servi de point de départ aux recherches d'analyse spectrale qui ont pris une si grande extension dans ces dernières années.

Le mode d'observation de Fraünhofer consiste à placer sur un théodolite un prisme en flint très-pur, et à observer directement au travers de ce prisme à l'aide d'une lunette, et de façon que les rayons incidents et émergents fassent le même angle avec les surfaces d'entrée et de sortie, l'image d'une ouverture rectiligne très-étroite faite au volet de la chambre noire parallèlement à l'arête du prisme et servant à introduire les rayons directs du soleil. Quand l'ouverture est très-étroite, les lignes fines sont visibles ; quand on augmente sa largeur, celles-ci disparaissent et les lignes fortes seules sont apparentes ; ce résultat tient à l'empiétement l'une sur l'autre des images prismatiques formées par les rayons voisins qui sont introduits par la fente.

La planche figure 12 représente l'image colorée du spectre solaire avec les 8 principaux groupes de raies auxquels Fraünhofer a donné les noms des lettres de l'alphabet depuis A jusqu'en H ; on y a joint le groupe *a* dans le rouge, et *b* dans le vert. La première partie de la planche figure 13 indique les différentes raies observées par Fraünhofer et dessinées par lui dans l'ouvrage cité précédemment ; il y en a plus de 300 ; la seconde partie de cette planche se rapporte aux raies de la région ultra-violette, dont il va être question dans le paragraphe suivant.

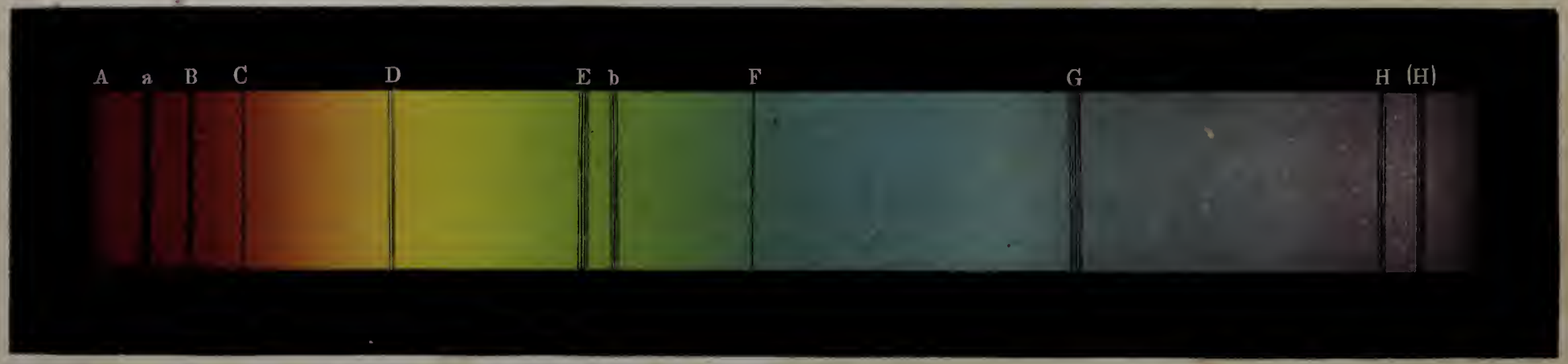
Il résulte de ses observations qu'en A il y a une raie bien prononcée, qui est presque à la limite du rouge ; elle est double, et pour la voir nettement (3) il faut regarder le spectre avec un verre coloré en bleu par le cobalt ; on élimine ainsi les rayons les plus lumineux orangés et rouges, et l'œil, non impressionné par ces rayons, distingue mieux l'extrémité rouge du spectre qui passe librement au travers du verre coloré. Le rouge se continue cependant un peu au delà de A.

(1) *Transactions philosophiques*, t. 92 (1802).

(2) *Mémoires de l'Académie de Munich de* 1814 à 1815, t. 5, p. 193 (1817). — *Astronomische Abhandlungen herausgegeben von H. Schumacher ;* 1823.

(3) *Biblioth. universelle de Genève*, t. 22, p. 382, 1839. — Athénéum, *Association britanique*, 1839. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 23, p. 185.

Fig. 12.



# RAIES DU SPECTRE SOLAIRE

Fig. 13

partie lumineuse colorée

partie violette et ultra-violette

*Obtenue photographiquement*

*Imprimerie Chatain.*

*Dulos sc*

Près de A se trouve, en *a*, un amas de 8 petites lignes très-fines; B est bien distincte et d'une épaisseur assez considérable ; de B à C il y a 9 raies bien déterminées; C est épaisse et noire comme B; entre C et D il y a 30 raies fines, qui, si on en excepte deux, ne peuvent être vues qu'avec un fort grossissement ou avec des prismes très-dispersifs; la même observation doit être faite entre B et C. D est formée de deux fortes raies séparées par une ligne claire; elle est dans le jaune ou dans la partie la plus lumineuse du spectre; entre D et E on rencontre environ 84 raies de différente grosseur, E consiste en plusieurs raies, dont celle du milieu est la plus forte; de E en *b* il y a à peu près 24 raies; en *b* on en trouve trois très-fortes, dont deux séparées par une raie fine et claire; *b* et E sont dans le vert. L'espace *b* F renferme à peu près 52 raies; F est très-grosse; elle est dans le commencement du bleu prismatique; entre F et G on peut compter 185 raies de différente épaisseur. En G se trouve un amas de beaucoup de raies, dont plusieurs sont remarquables par leur grosseur; de G en H il y a 190 raies. Les deux bandes H qui sont à la limite du violet sont presque égales et formées de plusieurs lignes, dans le milieu desquelles il s'en trouve une très-forte. Après H la couleur du spectre cesse d'être violacée, et prend une teinte grise lavande qui va en diminuant rapidement d'intensité à mesure que l'on s'éloigne de ces bandes; il se trouve dans cette région un très-grand nombre de lignes.

On voit, d'après cela, qu'avec le mode d'observation de Fraünhofer on peut compter au moins 600 raies noires dans l'intervalle des lignes A et H, qui terminent le rouge et le violet de l'image prismatique colorée. Fraünhofer, après avoir constaté que ces raies sont indépendantes de la nature et de l'angle des prismes, et qu'elles ne font que de se rapprocher plus ou moins suivant le pouvoir dispersif de ces prismes, en a conclu qu'elles dépendent de la nature de la lumière elle-même, c'est-à-dire des conditions de sa production. Ainsi il montra que les spectres formés par la lumière des planètes et de la lune ont les mêmes raies, lesquelles sont placées aux mêmes intervalles que pour la lumière solaire, conséquence d'une origine commune; mais qu'il n'en est pas de même de la lumière des étoiles, puisque quelques-uns de ces astres donnent des images prismatiques dont un certain nombre de raies sont les mêmes que celles de la lumière solaire, et dont d'autres sont différentes. Fraünhofer observa aussi que la lumière électrique pouvait donner des raies brillantes.

L'étude des images prismatiques de plusieurs flammes, et dont il va être question plus loin, suivit les recherches de Fraünhofer, et M. Brewster ayant observé que la vapeur d'acide hypoazotique produisait de nombreuses raies dans l'image prismatique, eut l'idée que des effets d'absorption analogues pouvaient se produire de la part de l'atmosphère terrestre sur certains rayons lumineux solaires et donner naissance à des raies d'une réfrangibilité déterminée. Il découvrit en effet en 1833 (1) que le spectre solaire présente des bandes obscures nouvelles quand le soleil est près de l'horizon. M. Brewster, dans ses recherches, avait en vue l'explication des raies noires du spectre solaire; on verra dans le chapitre suivant qu'il était réservé à M. Kirchhoff de donner l'explication très-probable de ce phénomène.

M. Brewster (2) en étudiant avec soin les différentes lignes noires du spectre solaire, en étendit beaucoup le nombre; on a vu que Fraünhofer en avait compté environ 600 de A à H; il en porta le nombre à près de 2000; il put même aller un peu au delà de A, et indiquer dans cette région quelques lignes noires. M. Kirchhoff (3), en faisant réfracter le faisceau des rayons solaires successivement à travers plusieurs prismes dans les appareils appelés spectroscopes, qui seront décrits plus loin, étendit encore davantage l'image prismatique, surtout dans la partie la plus lumineuse, et put résoudre en lignes très-fines des raies qui jusque-là avaient été considérées comme simples. Il porta à plus de 3000 le nombre de raies différentes contenu dans la partie colorée du spectre solaire.

On comprend qu'en augmentant beaucoup la dispersion de l'image prismatique, si l'intensité lumineuse est suffisante, on doit distinguer des détails qui échappent à l'analyse au moyen d'un simple prisme; aussi M. Gassiot (4) a-t-il observé qu'au moyen du passage successif de la lumière à travers 11 prismes en sulfure de carbone, les deux raies D, qui dans le dessin de Fraünhofer sont très-rapprochées l'une de l'autre, se trouvent assez écartées pour laisser voir 12 raies entre elles deux, et même peut-on en compter encore un plus grand nombre (5).

(1) *Transactions philosophiques d'Édimbourg*, t. 12, p. 544 et 545, 1833.

(2) *Transactions philosophiques anglaises*, t. 150, 1860.

(3) *Mém. de l'Acad. de Berlin*, 1861. — *Annales de chim. et de physique*, 3e série, t. 68, p. 5.

(4) *Ann. de chim. et de physique*, 4e série, t. 3, p. 507 (1865).

(5) Voir Silliman, *Magasine*, mars 1866. — *Biblioth. univ.*, nouvelle période, t. 26, p. 137, 1866.

On a indiqué les distances relatives des raies par leur position sur des figures comme celles qui sont représentées planche fig. 13. On pourrait, pour un prisme déterminé, évaluer leur écartement angulaire; mais ce n'est pas nécessaire pour l'étude qui nous occupe.

Cependant, afin de donner une idée de cet écartement, je dirai que Fraünhofer a trouvé, par exemple, qu'avec un prisme de flint d'un angle de 60°, et pour la position du minimum de déviation, les distances angulaires ont été :

| de B à C | de C à D | de D à E | de E à F | de F à G | de G à H |
|---|---|---|---|---|---|
| 11′ 12″, 6 | 31′ 14″, 8 | 41′ 21″, 4 | 38′ 14″, 8 | 1° 14′ 45″, 2 | 1° 8′ 3″, 6. |

Ce qui donne environ 4° $\frac{1}{2}$ pour la longueur totale du spectre visible de A à H. M. Fizeau (1) a observé que les deux raies D dont il a été question plus haut, vues à travers un prisme de même substance, paraissaient être à 17″ l'une de l'autre, c'est-à-dire environ à $\frac{1}{4}$ de minute angulaire.

Le crown, l'eau, dispersent moins la lumière que le flint ordinaire; mais le flint lourd et le sulfure de carbone ont un plus grand pouvoir dispersif; ainsi avec des prismes d'un angle de 60° la longueur totale du spectre visible, qui est angulairement de 4° $\frac{1}{2}$ avec le flint ordinaire, devient de 5° $\frac{1}{2}$ environ avec le flint lourd et de 8° $\frac{1}{4}$ avec le sulfure de carbone. Si l'on dispose plusieurs prismes à la suite les uns des autres, on peut, comme on l'a déjà dit plus haut, augmenter beaucoup l'écartement des raies du spectre.

Une partie des raies noires du spectre solaire, raies que l'on a nommées raies solaires, restent les mêmes quand on analyse toutes les sources lumineuses qui empruntent leur lumière au soleil, telles que les planètes, la lumière diffuse du jour, ainsi que celle des nuages; mais d'autres lignes varient d'intensité suivant les conditions atmosphériques ou même disparaissent quand le soleil est au zénith, et se montrent nombreuses quand il est près de l'horizon; il y en a même que l'on n'observe pas toujours quand l'air est sec.

Ces circonstances ont été signalées par M. Brewster, comme on l'a vu plus haut; elles ont été étudiées particulièrement par M. Janssen (2), qui a montré que des bandes obscures observées par M. Brewster, quand le soleil était près de l'horizon, pouvaient être résolues en raies fines

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 66, p. 429, 1862.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 54, p. 1280, 1862), — t. 56, — t. 57, — t. 60, p. 213, 1865.

et que ces raies fines variaient d'intensité suivant les épaisseurs atmosphériques traversées par les rayons solaires. En outre, MM. Brewster et Gladstone avaient inutilement recherché en 1860, avec une lumière artificielle placée à distance, les bandes que la couche d'air interposée devait produire; M. Janssen les observa dans la flamme d'un grand bûcher de bois de sapin placé près du lac de Genève à 21 kilomètres de distance, tandis que la même flamme, près des appareils, donnait un spectre continu. Il a même pu produire par absorption des bandes et des raies obscures en se servant de la lumière artificielle du gaz d'éclairage traversant un tube de 37 mètres de longueur rempli de vapeur d'eau à 7 atmosphères de pression (1).

D'après M. Janssen, le groupe A, une partie de B, C et ainsi que deux bandes entre C et D, sont dus dans l'atmosphère à la présence de la vapeur d'eau. Au moyen de tubes suffisamment longs, il sera peut-être possible de reconnaître si les gaz oxygène et azote produisent des raies par absorption et quelle est leur part afférente dans la production des raies du spectre solaire. Ces lignes du spectre de la lumière solaire qui sont produites par l'absorption de l'atmosphère, et en partie par la présence de la vapeur d'eau, ont été nommées raies atmosphériques ou telluriques; c'est principalement dans le voisinage de D qu'elles sont manifestes. On a réservé le nom de raies solaires à celles qui sont produites en dehors de notre atmosphère et par l'action solaire elle-même.

Fraünhofer avait observé que les spectres lumineux des étoiles présentent des raies noires dont quelques-unes se retrouvent dans la lumière solaire, mais dont d'autres sont différentes; ainsi le spectre de Sirius donne trois raies noires remarquables, qui n'existent pas dans le spectre solaire, une dans le vert, deux dans le bleu. Il avait compris toute l'importance de cette étude en vue de l'astronomie. Les recherches faites dans cette voie avaient été cependant négligées; mais depuis plusieurs années elles ont été reprises, et l'on peut citer parmi les observateurs qui s'occupent de cette importante question M. Donati (2) et surtout M. W. Huggins (3), M. Miller ainsi que le père Secchi (4).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 63, p. 289, 1866.

(2) *Museo fiorentino*, vol. 1, *seria secunda*, 1860. — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. 67, p. 247.

(3) *Proceding of the royal Societ.*, t. 12, 14 et 15. — *Philosoph. transact*, 1864 et 1866. — *Monthly notices, roy, astr. Societ.*, t. 25 et 26.

(4) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 57, p. 71, — t. 59, p. 182 et 309, — t. 63, p. 364 et 621 (1866).

Pour se rendre compte des résultats qui vont être indiqués ci-après, il faut remarquer qu'avec les sources lumineuses artificielles, les spectres offrent des images continues ou discontinues suivant les conditions de leur production. Avec les corps solides ou liquides incandescents, les spectres sont en général continus sans solutions de continuité; si la lumière émane au contraire de gaz incandescents, elle donne des raies ou bandes lumineuses interrompues par des parties obscures; enfin, si la source lumineuse est un noyau incandescent enveloppé de masses gazeuses, l'image est traversée par des lignes obscures ou noires provenant de l'absorption de la lumière dans son trajet au travers de cette atmosphère absorbante.

M. W. Huggins, conjointement avec M. Miller, a observé les spectres des astres au moyen de la réfraction à travers deux prismes de flint, et les positions des raies obscures ou lumineuses de ces images ont été comparées à celles des bandes lumineuses observées simultanément en faisant passer des étincelles entre des conducteurs métalliques de diverse nature, comme on le verra dans le cinquième livre.

L'étude des images prismatiques de la lune leur a offert la même composition que la lumière solaire, et sans que rien vînt indiquer la présence d'une atmosphère autour de notre satellite. La plupart des planètes n'ont pas offert des différences bien grandes et dignes d'être signalées, à l'exception de Jupiter, dont l'image a présenté une bande correspondant à quelques raies atmosphériques terrestres, ainsi qu'une autre bande obscure qui n'a pas sa correspondante parmi les raies du spectre solaire, et qui semblerait signaler dans l'atmosphère de cette planète la présence de quelque gaz ou vapeur qui n'existe pas dans notre atmosphère.

Les images réfractées des étoiles fixes leur ont appris que ces astres ressemblent au soleil quant au plan de leur constitution, et que leur lumière semble émaner en général d'une matière incandescente entourée de vapeurs absorbantes, mais qu'il existe une grande diversité de composition. Comparant la position des raies de ces images prismatiques avec celles des bandes lumineuses des flammes dans lesquelles se trouvent différents éléments chimiques, et dont il va être question dans le chapitre suivant, et en raisonnant dans cette hypothèse que la coexistence des mêmes raies indique la présence probable des mêmes substances, ils ont reconnu qu'à part plusieurs exceptions, ceux des éléments terrestres qui sont le plus répandus dans les spectres des étoiles

sont ceux qui sont essentiels à la vie sur la terre, savoir l'hydrogène, le sodium, le magnésium et le fer.

Parmi les résultats observés par M. Huggins, on peut citer les suivants : β de Pégase contient du sodium, du magnésium et probablement du barium; α de la Lyre, Véga, du sodium, du magnésium et du fer; Sirius, du sodium, du magnésium, du fer et de l'hydrogène; Pollux, du sodium, du magnésium et du fer. Toutes les étoiles soumises à l'analyse prismatique semblent posséder quelques éléments communs au soleil et à la terre, mais probablement dans chaque étoile leur groupement est différent.

α d'Orion et β de Pégase offrent, comme un petit nombre d'étoiles, une particularité digne de remarque : c'est l'absence caractéristique des deux lignes de l'hydrogène, l'une dans le bleu qui correspond à F, l'autre dans le rouge qui se confond avec C. Il n'y aurait donc pas d'eau dans leur atmosphère.

On a beaucoup d'exemples d'étoiles qui brillent temporairement avec un vif éclat, puis diminuent d'intensité ou même cessent tout à fait d'être visibles; telle est l'étoile qui brilla tout à coup en mai 1866 dans la Couronne boréale, et après plusieurs jours tomba au-dessous de la 10e grandeur. L'étude prismatique montra un spectre à raies noires, mais contenant quatre raies brillantes qui semblent indiquer qu'une incandescence temporaire, peut-être une combustion subite d'hydrogène, a produit ce curieux phénomène.

Les nébuleuses sont, comme on le sait, les unes résolubles en étoiles dont la distance jusqu'à nous est immense, et les autres formées de matière qui n'est pas suffisamment agglomérée pour constituer des astres. L'analyse prismatique vient à l'appui de cette conjecture, car les images des spectres des nébuleuses non résolubles sont à lignes lumineuses indiquant l'état gazeux des matières qui les constituent. Mais l'étude de ces astres est très-difficile en raison de la faiblesse de leur lumière.

En même temps que M. Huggins s'est livré à ces recherches d'astronomie physique, le père Secchi a étudié de son côté les mêmes questions avec non moins de persévérance.

L'emploi d'un appareil à vision directe analogue à un de ceux qui seront décrits un peu plus loin dans ce livre lui a permis de soumettre à l'analyse prismatique les étoiles jusqu'à la septième grandeur; aussi le nombre de celles dont il a pu étudier la lumière monte-t-il déjà à plusieurs centaines. Il a reconnu qu'il y a une certaine

uniformité dans la constitution lumineuse des astres et non pas une très-grande diversité, comme on pouvait s'y attendre. En comparant les images prismatiques observées, il a vu qu'elles pouvaient se partager en trois groupes ou se rapporter à trois types, et qu'il était fréquent de trouver des étoiles de même type dans la même région du ciel; cependant, il y a des exceptions.

Le 1er type comprend les étoiles colorées (en jaune ou en rouge) comme α d'Orion, α du Scorpion, φ de Pégase, etc. Ces astres ont un spectre formé de larges bandes. D'après ce que l'on verra plus loin, ils auraient une incandescence moins vive que les autres astres, et seraient entourés d'une atmosphère assez épaisse.

Le 2e type comprend les étoiles blanches faiblement colorées, dont les spectres possèdent des raies noires très-fines et bien arrêtées comme Arcturus, α de la grande Ourse, β de l'Aigle, la Chèvre, Procyon, etc. Ces astres se rapprochent du type solaire.

Le 3e type comprend les étoiles blanches et bleues telles que Sirius, Véga, α de l'Aigle. Les spectres de ces astres sont caractérisés par une large bande dans le bleu à la place de la raie F, par une 2e bande dans le violet et parfois par une 3e bande dans le violet extrême, concurremment avec des lignes noires très-fines. La moitié au moins des étoiles visibles appartiennent à ce type.

Quelques astres font exception; ainsi dans l'étoile γ de Cassiopée la ligne F est une ligne brillante; le contraste est remarquable, car en examinant des étoiles voisines dans la même constellation, on trouve que cette ligne est obscure. Si l'on raisonne dans l'hypothèse de M. Kirchhoff, sur la production des raies du spectre, hypothèse dont il sera question plus loin, on voit que la même substance gazeuse (peut-être l'hydrogène ou la vapeur d'eau) qui dans l'étoile γ de Cassiopée, est incandescente et se comporte comme source de lumière, est au contraire répandue autour des astres qui présentent en noir la ligne F, et agit comme substance absorbante.

On comprend tout l'intérêt que présentent ces recherches, et quelle est l'importance pour l'étude de l'astronomie de l'analyse spectrale des différents astres si les moyens d'observation viennent à être perfectionnés et que l'on puisse étudier plus complétement la lumière des nébuleuses, celle des astres qui changent de forme ou d'éclat, enfin celle des différents météores, comme on étudie la lumière des étoiles les plus brillantes.

§ 2. *Spectre ultra-violet.*

Le spectre solaire n'est pas limité aux dernières lignes dessinées par Fraünhofer du côté du violet; au-delà se trouvent des rayons très-réfrangibles dont l'action chimique ainsi que l'action de phosphorescence est puissante. On a vu dans le livre Ier, page 31, quelles ont été les premières recherches faites par Ritter et par Wollaston pour constater l'extension du spectre au-delà du violet. En 1840, M. J. Herschell (1) en étudiant l'action du spectre sur des substances chimiquement impressionnables ne put observer s'il existe des espaces inactifs dans le spectre chimique et correspondant aux raies noires du spectre lumineux. Deux ans après (2), je démontrai non-seulement l'existence de raies noires dans les images photographiques, c'est-à-dire l'existence des parties inactives, mais encore l'identité des raies que l'on pouvait voir dans les parties lumineuses où des impressions photographiques avaient lieu, avec les raies tracées photographiquement sur les mêmes impressions.

La méthode dont je fis usage consiste à projeter sur un écran un spectre produit par un prisme de flint-glass très-pur et une lentille de 1 mètre de foyer. La lentille est placée immédiatement derrière le prisme, à 2 mètres de la fente par laquelle entrent les rayons solaires; l'écran est situé à 2 mètres environ de la lentille et est disposé pour recevoir les papiers enduits de matières impressionnables, sels d'argent, etc., ou bien les plaques d'argent iodurées. Après une exposition plus ou moins longue, on trouve représentées sur les surfaces impressionnables un très-grand nombre de raies; elles ont été dessinées sur une planche annexée au mémoire cité ci-contre. En mesurant leurs distances respectives, on reconnaît qu'entre A et H ce sont les mêmes raies que pour les rayons lumineux et identiquement aux mêmes places : seulement, on ne voit dans les images du spectre chimique que les grosses raies et les moyennes, car en général le spectre n'est jamais aussi net que vu à travers une lunette dont on peut déplacer l'oculaire, la position du foyer de l'oculaire, quand on examine différentes parties du spectre, dépendant de la réfrangibilité des rayons actifs. Dans des

(1) *Philosoph. transact.*, 1840. — *Philosoph. magazine*, 1840. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 26, p. 404.

(2) *Bibliothèque univ. de Genève*, t. 40, 1842.

recherches faites l'année suivante (3), j'indiquai comment en agrandissant beaucoup le spectre on obtenait les raies très-écartées et comment on pouvait en avoir de très-déliées. On voit, d'après cela, que les mêmes raies existent dans le spectre lumineux et dans le spectre chimique, et que la même cause a déterminé leur production.

Au delà de H, le spectre chimique a une infinité de raies; jusqu'en M à peu près elles sont encore les mêmes que celles du spectre lumineux; au delà les rayons lumineux s'affaiblissent toujours, et on ne peut plus les comparer. La deuxième partie de la planche figure 13 peut servir à suivre la description ci-après indiquée; cette figure représente un spectre plus étendu que celui que j'ai décrit, car il a été obtenu au moyen d'expériences faites avec des prismes en quartz, comme on le dira plus loin. Les lettres placées au bas de la figure se rapportent aux dénominations que j'ai données; celles placées au-dessus ont été employées par les physiciens dont il sera question plus loin.

Après H on voit un très-grand nombre de raies, et parmi celles-ci une raie I très-large, formée par la réunion d'un certain nombre de raies plus petites. Après elle, en M, viennent quatre raies remarquables par leur netteté; elles sont égales en grosseur et à peu près à égale distance; la dernière seule est un peu plus éloignée. Au-delà de ces raies, en N, se trouvent quatre autres raies plus fortes que les précédentes, presque égales entre elles, la quatrième un peu plus large que les autres. Il existe en O deux grosses raies à la même distance entre elles que les deux raies H, la première étant un peu plus forte que la seconde. Ensuite viennent d'autres fortes raies, parmi lesquelles on distingue la raie P, qui est très-forte et très-noire; après celle-ci il y en a d'autres, mais à peine distinctes, car avec le flint on est presque à la limite à laquelle s'étend le spectre chimique.

J'ai démontré également que les parties actives du spectre sur les matières phosphorescentes, pour les mêmes régions du spectre, possèdent des raies identiques aux raies lumineuses et aux raies chimiques. Ces recherches m'ont conduit à cette conclusion que les phénomènes lumineux, chimiques et de phosphorescence, et l'on peut ajouter calorifiques, proviennent d'un seul et même agent, dont l'action est modifiée suivant la nature de la matière sensible; la seule différence consiste en ce que chaque effet a lieu entre des limites diverses de réfrangibilité.

(3) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 9, 1843.

Ainsi c'est le même rayonnement qui produit ces effets, et quand des rayons d'une certaine réfrangibilité viennent à manquer, il se manifeste une raie, c'est-à-dire qu'il y a absence d'action pour toute espèce d'effet qui aurait lieu dans la partie du spectre que l'on considère. C'est pour ce motif qu'il suffit de nommer spectre ultra-violet la partie de l'image prismatique composée de rayons plus réfrangibles que H.

Depuis ces recherches plusieurs physiciens ont reproduit des images photographiques des raies de la partie ultra-violette sans apporter d'autres modifications à la méthode que j'ai suivie que la substitution d'un prisme et d'une lentille de quartz aux prismes et lentilles de flint; cette substitution leur a seulement permis d'aller plus loin, le quartz étant plus transparent que le verre pour les rayons très-réfrangibles. On peut citer les dessins faits par MM. Draper, Karsten et Miller (1).

M. Muller (2) a reproduit photographiquement différentes parties séparées du spectre et a donné un dessin qui les réunit toutes et qui s'étend assez loin; c'est celui d'après lequel on a dessiné les raies allant jusqu'en R dans la seconde partie de la planche figure 13, et qui depuis H en contient environ 80 bien nettes.

M. Mascart (3), dans un travail sur le spectre solaire ultra-violet et sur la détermination des longueurs d'onde, s'est servi de prismes en spath d'Islande, et a été plus loin encore que ces physiciens. Son spectre contient 700 raies distinctes depuis H jusqu'en T. Quant aux dénominations des lignes remarquables dans la partie ultra-violette, elles sont indiquées à la partie supérieure de la 2e partie de la planche 13 : au lieu de la lettre I, que j'avais proposée, on a mis la lettre L pour désigner le même groupe de lignes; M reste à la place où je l'ai indiqué; le groupe que j'avais nommé O a été appelé N, et le groupe P de la figure que j'avais dessinée est désigné par O.

On a vu plus haut que les phénomènes de phosphorescence pouvaient indiquer la présence des raies dans la partie la plus réfrangible du spectre; en 1852, M. Stockes (4), au moyen des effets analogues, mais qui se manifestent avec des substances organiques telles que du papier enduit de sulfate de quinine, et comme on le verra dans le livre VI, montra que l'on pouvait rendre ces raies immédiatement visibles. Le

(1) *Transactions philosophiques*, 1859 et 1862.
(2) Muller, *Lehrburch der physik*, 1863, tome 1er, planche 4.
(3) *Annales scientifiques de l'école normale supérieure*, t. 1, 1864.
(4) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 44.

dessin qu'il fit à cette occasion présente les plus grandes analogies avec celui que j'avais donné en 1842. En même temps, M. Stockes remarquant que les verres ordinaires absorbaient une grande partie des rayons les plus réfrangibles, fit usage de prismes et de lentilles en quartz.

Les rayons plus réfrangibles que les rayons violets ne sont pas absolument invisibles, mais agissant moins vivement sur la rétine que les rayons colorés, il faut éliminer ceux-ci autant que possible pour qu'ils puissent impressionner nos yeux. Alors on peut distinguer à la vue presque tous les rayons qui agissent chimiquement, et voir à peu près toutes les raies qui sont dessinées sur la 2e partie de la planche figure 13. Mais ne serait-ce pas par une action particulière de phosphorescence des liquides de l'œil que cet effet serait produit?

M. J. Herschell avait montré que les rayons situés au delà du violet pouvaient agir sur la rétine en donnant une nuance qui n'était pas violette et qu'il avait nommée gris-lavande. En 1844, M. Matthiessen, peu de temps après la publication de mes deux mémoires, construisit un petit appareil qu'il nomma lentiprisme, et qui était formé d'un prisme accolé à une lentille cylindrique de façon que l'axe du cylindre fût parallèle à l'arête du prisme. En regardant directement l'image d'une fente bien éclairée, il put distinguer les raies du spectre au delà du violet presque jusqu'en R. Je possède une lithographie d'un dessin du spectre qu'il fit faire et qu'il me remit à cette époque, et qui renferme les différentes raies qu'il avait observées jusqu'en P; ce sont les mêmes que celles que j'avais dessinées.

MM. Helmholtz (1) et Esselbach (2) ont employé des moyens analogues, mais en opérant à l'aide de prismes et de lentilles en quartz, et en prenant des dispositions pour éliminer, à l'aide d'écrans, toute trace de lumière étrangère et pour augmenter l'intensité des rayons actifs. Ils ont pu reconnaître avec la vue, comme M. Matthiessen, les raies dont j'avais montré l'existence et qui ont été indiquées plus haut.

### § 3. *Spectre infra-rouge.*

Le spectre solaire n'est pas plus limité à l'extrême rouge vers la raie A qu'à l'extrême violet; en deçà non-seulement des actions calori-

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 94. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 44.
(2) *Ann. de Pogg.*, t. 98. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 50.

fiques peuvent se produire, mais encore on peut obtenir des effets de phosphorescence, comme on le verra dans le livre VI. W. Herschell, ainsi qu'on l'a vu livre 1er, page 31, découvrit cette extension des effets calorifiques au delà du rouge, et montra combien elle peut s'étendre loin; Seebeck (1) observa que le maximum d'action calorifique se déplaçait avec la nature du prisme et pouvait se trouver dans l'espace rouge, c'est-à-dire dans la partie lumineuse prismatique, et Melloni (2) montra que cet effet tenait à l'inégale absorption des rayons de la partie invisible, moins réfrangible que le rouge, par les matières des prismes. Avec le sel gemme, qui est le corps le plus transparent connu jusqu'ici pour les rayons les moins réfrangibles, il trouva que le maximum d'effet calorifique se trouvait en dehors de l'extrême rouge, à une distance de cette extrémité à peu près égale à celle qui sépare le rouge du bleu-vert, c'est-à-dire au delà de la ligne B, à peu près à une distance égale à B F. Ces recherches ont été confirmées depuis par les physiciens qui se sont occupés de ce sujet; ainsi, l'étendue du spectre infra-rouge peut être au moins égale à celle du spectre visible. On reviendra du reste sur ce sujet dans la deuxième partie de cet ouvrage.

Il est nécessaire pour l'étude de cette partie du spectre d'avoir recours à des réactions qui se produisent sous l'influence des rayons dont elle est composée. Sous ce rapport les phénomènes calorifiques sont peut-être les seules réactions qui puissent être observées dans toute l'étendue du spectre infra-rouge; mais leur intensité est loin d'être suffisante, et les appareils thermométriques employés, thermomètres ou piles thermo-électriques, étant relativement moins sensibles que la rétine ne l'est pour les rayons colorés et que les corps chimiquement impressionnables ne le sont pour les rayons ultra-violets, il est nécessaire d'augmenter beaucoup l'intensité du spectre actif, et même dans ces conditions on n'a pu jusqu'ici que reconnaître quelques particularités de cette portion du spectre. D'un autre côté, le sel gemme, quoique transparent, n'est pas suffisamment limpide pour qu'on puisse voir les raies comme avec le verre, le quartz, le spath, etc.; du moins ceux que j'ai eus à ma disposition n'ont pas été d'une limpidité suffisante; on est donc obligé d'avoir recours à d'autres matières, dont l'absorption limite l'étendue la moins réfrangible de l'image prisma-

(1) *Mém. de l'Acad. de Berlin*, 1819.
(2) Journal *l'Institut*, tome 1er, page 212.

tique et qui peuvent même faire naître des bandes d'absorption dans certaines parties de cette image.

On a dit plus haut, page 130, que les rayons rouges s'étendent un peu au delà de la double ligne A, et qu'en employant un verre bleu de cobalt, qui élimine les rayons dont l'intensité lumineuse est la plus grande, cette extension était visible. M. Matthiessen, en 1844, et sur le même dessin des lignes du spectre dont j'ai parlé page 141, a indiqué que de A à une distance à peu près égale à A *a* il existe une bande obscure formée de lignes fines au milieu desquelles se trouve une ligne plus forte. En 1860, M. Brewster, dans le mémoire déjà cité, étendit un peu plus loin cette étude, et indiqua des raies et des bandes dans la région très-rapprochée de A. En résumé, la vision directe ne permet d'étendre que très-peu le spectre au delà de A.

MM. Fizeau et Foucault (1), en faisant usage de thermomètres dont la capacité avait une très-petite dimension, ont indiqué dans le spectre formé avec un prisme en flint l'existence d'une large bande obscure dans la partie infra-rouge et à peu près à la même distance de A que la ligne D. On conçoit que les lignes les plus fines ne pouvaient être rendues manifestes de cette manière.

M. J. Herschell (2) a donné un moyen d'étude du spectre calorifique, lequel consiste à enduire d'un côté un papier à l'aide de noir de fumée et de l'imbiber d'éther ou d'alcool; en projetant le spectre sur le côté opposé du papier quand il est encore humide, on voit que l'évaporation donne lieu à des taches inégalement distribuées du côté du rouge, et s'étendant au delà de cette couleur. Mais ce procédé est trop imparfait pour qu'on puisse baser sur son emploi une étude de la partie la moins réfrangible du spectre, car l'évaporation n'est pas limitée à la portion du papier directement échauffée.

Si des actions chimiques pouvaient se produire sous l'influence des rayons moins réfrangibles que les rayons rouges on aurait facilement les raies qui pourraient se trouver dans cette partie du spectre; comme on le verra dans la deuxième partie de cet ouvrage, des actions chimiques peuvent bien s'étendre au delà du rouge, mais cette extension est toujours restreinte et ne va pas loin au delà de la raie A. Les effets de phosphorescence permettent d'atteindre ce but, non pas dans toute l'é-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 25, p. 447, 1847.

(2) *Philosoph. magazine*, avril 1840. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 26, p. 404, 1840.

tendue du spectre infra-rouge, car la partie active ne s'étend pas aussi loin que celle qui agit pour élever la température des corps, mais enfin jusqu'à une distance de A égale à celle de AE au moins; ces effets ne sont pas aussi faciles à observer que les actions chimiques, mais ils donnent quelques indications assez intéressantes.

Voici le procédé dont j'ai fait usage, et sur lequel je reviendrai dans le livre VI à propos de l'action des rayons de diverse réfrangibilité sur les corps phosphorescents : On enduit une feuille mince de carton de sulfure de strontium phosphorescent vert, ou bien de sulfure de zinc hexagonal phosphorescent (1), en mettant sur le carton une couche mince de gomme arabique et en projetant sur la surface à l'aide d'un tamis fin une petite couche de la matière. Quand la surface est sèche, on l'expose entièrement à la lumière diffuse, puis immédiatement après on la rentre dans la chambre noire, et l'on projette sur elle un spectre très-pur et très-intense présentant les lignes noires. Au bout de quelques instants, en refermant l'ouverture de la chambre noire, on voit que toute la surface du carton est encore lumineuse, sauf dans la partie située depuis la raie F jusqu'au delà de A, où la phosphorescence se trouve détruite. On verra en effet que cette partie du spectre n'agit pas de la même manière que la partie la plus réfrangible, et donne lieu à une destruction de la phosphorescence produite par les autres rayons. S'il y a des raies ou des espaces inactifs, elles demeurent brillantes par rapport aux parties voisines du spectre. Par ce moyen on ne peut qu'opérer très-rapidement, car la faiblesse de la teinte lumineuse émise par l'action propre de la matière ne permet pas de distinguer les lignes; mais si à cet instant on élève la température de l'envers de la carte à l'aide d'une lampe à alcool, on voit aussitôt la lumière augmenter partout excepté dans les parties où les rayons les moins réfrangibles ont agi; les lignes lumineuses dans ce cas indiquent les raies ou les espaces inactifs du spectre solaire.

N'ayant pas encore terminé les recherches que je fais sur ce sujet, je ne donnerai pas le dessin des espaces inactifs que j'ai observés; on trouvera seulement sur la planche fig. 32 l'indication d'un espace obscur dont on reconnaît la présence en employant des prismes en flint très-blanc, ou des prismes en sulfure de carbone. Ce large espace inactif paraît correspondre à celui dont on a parlé plus haut, et est situé au

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 63, p. 143; 1866.

de là de A, à une distance qui est environ égale à A D ; mais plus loin il y a comme un espace plus étroit, où la destruction de l'action de phosphorescence a lieu plus vivement qu'autour : c'est comme une sorte de large ligne active, peut-être divisée en deux, moins large que l'intervalle des deux raies H, et qui serait une ligne brillante si cette partie du spectre pouvait être visible. Plus près du rouge j'ai observé une ligne semblable et plus étroite.

Il serait nécessaire d'opérer avec un prisme et une lentille en sel gemme pour savoir jusqu'à quel point la matière du prisme n'influe pas sur les effets observés; mais, d'après ce qui a été dit plus haut, je n'ai pu me procurer jusqu'ici d'échantillon de sel gemme assez pur pour distinguer nettement les raies du spectre.

### § 4. *Longueur d'onde des rayons de diverse réfrangibilité.*

La théorie des ondulations suppose que les vibrations des molécules des corps lumineux sont transmises par l'intermédiaire de l'éther, par ondes successives, comme les vibrations sonores, mais avec une vitesse beaucoup plus grande et dans des conditions autres quant à la direction de ces vibrations. La longueur d'onde pour un rayon lumineux est alors la distance de deux ondes consécutives, c'est-à-dire l'espace parcouru par la lumière pendant le temps que met une molécule éthérée à effectuer une vibration entière.

La couleur d'un rayon de lumière est essentiellement liée à la longueur d'onde, et les observations d'Arago sur les étoiles changeantes ont montré que dans les espaces planétaires tous les rayons lumineux s'y propagent avec la même vitesse. Et appelant donc V la vitesse de la propagation de la lumière par seconde dans le vide, $n$ le nombre de vibrations faites pendant ce temps, et $\lambda$ la longueur d'une onde entière relative au rayon que l'on considère, on aura la relation

$$V = n\lambda.$$

Les recherches sur les interférences, ainsi que celles sur les effets de diffraction observés avec les réseaux, ont permis de calculer directement les longueurs d'onde $\lambda$ entre les limites extrêmes de réfrangibilité A et H des rayons visibles; les observations de Newton sur les couleurs des lames minces, les travaux de Fresnel (1), mais surtout les détermina-

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 5, 1821.

tions de Fraünhofer (1) ont conduit à des valeurs peu différentes de celles qui ont été trouvées depuis par différents physiciens (2).

L'observation des spectres des réseaux avec les rayons ultra-violets ont fait le sujet des recherches de M. Mascart (3), et lui a permis de donner des évaluations s'étendant jusqu'aux dernières limites des rayons qui influent sur les matières chimiquement impressionnables.

Quant aux rayons infra-rouges, dont l'étude présente certaines difficultés, comme on l'a vu page 141, on n'a pu obtenir des valeurs que dans des circonstances particulières et pour une réfrangibilité bien déterminée; ainsi M. Fizeau (4) a montré comment on pouvait calculer la longueur d'onde d'une partie du spectre en dehors du rouge où se trouve la bande obscure dont il a été question plus haut, et qui est placée à peu près à la distance de la ligne A, égale à celle de A à D. Si l'on veut avoir une idée de la longueur d'onde des rayons moins réfrangibles, il faut admettre une relation empirique entre cette quantité et la réfrangibilité des rayons (5); mais on n'a de cette manière que des nombres sur l'exactitude desquels l'expérience n'a pas prononcé. Il faut espérer que des recherches seront entreprises dans cette direction et pourront conduire à des évaluations directes des longueurs d'onde des rayons calorifiques les moins réfrangibles.

Si l'on admet pour la vitesse de la lumière 300000 kilomètres par seconde, on aura d'après la formule indiquée plus haut pour les valeurs moyennes de $\lambda$ et de $n$ correspondant aux rayons différemment réfrangibles du spectre solaire :

(1) *Mém. de l'Acad. de Munich.*, et *Ann. de Gilbert*, t. 74.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, t. 49, p. 504. — *Ibid.*, t. 50. *Ann. de Poggendorf*, t. 98 et 123. — *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 58, p. 1153, 1864. — *Ann. de l'École normale*, t. 1, 1864.

(3) *Ann. de l'École normale*, t. 1er.

(4) *Bulletin de la Société philomatique*, t. 3, p. 108, décembre, 1847. — Billet, *Traité d'optique*, t. 1, p. 45.

(5) Müller, *Lehrbuch der Physik*, 1863, t. 2, p. 745.

| PARTIES DU SPECTRE SOLAIRE INDIQUANT LA RÉFRANGIBILITÉ DES RAYONS. | LONGUEUR D'ONDE λ EN MILLIONIÈMES DE MILLIMÈTRE. | NOMBRE DE VIBRATIONS n PENDANT UN MILLIONIÈME DE SECONDE. |
|---|---|---|
| Limite extrême des rayons calorifiques du spectre solaire formé avec un prisme en sel gemme (Müller). | 4800? | 63000000 |
| Limite extrême des rayons calorifiques du spectre solaire formé avec un prisme en flint (Fizeau). | 1940? | 155000000 |
| Partie du spectre extra-rouge où se trouve une large raie. | 1445 | 208000000 |
| A (extrême rouge). | 761 | 394000000 |
| D (jaune). | 589 | 509000000 |
| F (commencement du bleu). | 486 | 617000000 |
| H (extrême violet). | 396 | 758000000 |
| Derniers rayons chimiques actifs (1). | 317 | 946000000 |

Les deux premières évaluations reposent sur des formules empiriques, comme on l'a vu plus haut; les autres sont déduites des expériences de diffraction.

On voit que pour les rayons les plus lumineux du spectre la longueur d'onde est un peu plus grande que 500 millionièmes de millimètre ou $\frac{1}{2}$ millième de millimètre, et que le nombre de vibrations des molécules éthérées qui transmettent cette lumière est à peu près de 500 millions par chaque millionième de seconde.

On peut remarquer avec quelle rapidité croît la longueur d'onde quand la réfrangibilité diminue, surtout dans les rayons les moins réfrangibles; car en passant de D à A, elle augmente à peu près de $\frac{1}{4}$ de sa valeur, tandis qu'en passant de A à la partie du spectre solaire où se trouve une large raie infra-rouge, elle est presque doublée. Au delà, la longueur d'onde des rayons calorifiques extrêmes, si la supposition d'où l'on est parti est exacte, serait dix fois plus grande que celle des rayons bleus. Dans la partie ultra-violette au contraire, une différence très-petite dans la longueur d'onde correspond à une grande différence dans la réfrangibilité.

(1) M. Mascart a trouvé qu'avec les rayons émis lors de l'incandescence du cadmium on avait des rayons réfractés bien plus réfrangibles encore et pouvant donner une longueur d'onde presque moitié de celle relative à H; cette longueur d'onde peut descendre à 220, et le nombre de vibrations est alors de 1364000000 par millionième de seconde.

Newton (1), dans ses recherches sur les couleurs des lames minces, a fait remarquer que les épaisseurs des couches d'air entre les lames de verre qui donnent lieu au phénomène des anneaux colorés, là où les anneaux sont formés par la limite des sept teintes principales du spectre, sont entre elles comme les racines cubiques des carrés des nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire des nombres qui expriment les longueurs d'une corde de musique rendant les notes suivantes d'une gamme : ut, ré, mi ♭, fa, sol, la, si, ut.

Si cette loi existait, elle aurait également lieu entre les longueurs des ondes lumineuses, qui sont proportionnelles aux épaisseurs ci-dessus indiquées. Il serait très-curieux en effet qu'il y eût entre les longueurs d'onde des divers rayons colorés des rapports simples semblables à ceux que l'on trouve en acoustique pour exprimer les intervalles musicaux.

Pour montrer quels sont les rapports qui peuvent exister entre les longueurs d'onde de rayons lumineux de couleur bien définie, je citerai les valeurs relatives aux parties du spectre solaire dont les teintes, d'après M. Chevreul (2), donnent les principales couleurs simples; les longueurs d'onde sont déduites des recherches les plus récentes :

| RAIES DU SPECTRE SOLAIRE. | COULEUR DES RAYONS. | LONGUEUR D'ONDE λ. | LONGUEUR D'UNE CORDE RENDANT DIFFÉRENTS SONS m. | PRODUIT λ m. |
|---|---|---|---|---|
| A | Extrême rouge du spectre. | 761,0 | $\frac{1}{2}$ (ut). | 380,5 |
| Milieu de B à C. | Rouge. | 671,4 | $\frac{3}{5} \times \frac{25}{24}$ (la ♯). | 386,6 |
| Près de D à $\frac{1}{8}$ de D E. | Jaune. | 581,1 | $\frac{2}{3}$ (sol). | 387,7 |
| Milieu entre E et b. | Vert. | 521,7 | $\frac{3}{4}$ (fa). | 391,2 |
| F | Bleu. | 486,0 | $\frac{4}{5}$ (mi). | 388,8 |
| H | Violet. | 396,7 | 1 (ut). | 396,7 |

Les rapports qui se déduisent de cette comparaison ne sont pas semblables à ceux que Newton avait indiqués, et qui ont été rapportés plus

(1) *Traité d'optique*, livre 2, traduction de Coste, p. 280.
(2) *Mémoires de l'Acad. des sciences de l'Institut de France*, t. 33, p. 39.

haut, car les longueurs d'onde relatives aux différentes couleurs simples, d'après ce qui précède, seraient simplement en raison inverse des longueurs d'une corde rendant des sons à divers intervalles musicaux.

On ne saurait attacher beaucoup d'importance à des comparaisons de ce genre; en effet, les longueurs d'onde entre A et H ne varient que dans le rapport de 2 à 1 comme les longueurs d'une corde qui rend un son et son octave aigu, et quand même il n'y aurait aucune loi semblable entre ces deux ordres de phénomènes, entre les deux nombres 1 et 2 se trouvent nécessairement les valeurs intermédiaires des longueurs d'onde, qui arrivent toujours à différer très-peu des nombres exprimant les différents intervalles musicaux; d'un autre côté, les limites des couleurs dans le spectre lumineux ne sont pas nettement tranchées, et plusieurs parties de l'image prismatique, comme le vert, le bleu, occupant une certaine étendue sans que leur nuance change d'une manière notable, des rayons qui impressionnent la rétine à peu près de la même manière se trouvent avoir des longueurs d'onde différentes. On ne peut donc décider actuellement d'une manière affirmative si les longueurs d'onde des rayons relatifs aux différentes couleurs ont entre eux des rapports simples, comme les intervalles musicaux.

# CHAPITRE II.

## Sources lumineuses par incandescence.

### § 1er. *Appareils destinés à l'étude spectrale ou spectroscopes.*

On a vu précédemment que Fraünhofer, dans ses recherches sur le spectre lumineux, avait fait usage d'un prisme de flint très-pur placé sur un théodolite, et qu'il examinait avec une lunette l'image d'une ouverture longitudinale vue par réfraction au travers du prisme. La disposition la plus simple, quand on ne veut pas mesurer les distances angulaires des lignes lumineuses ou obscures, consiste à se servir d'un appareil muni d'un collimateur, comme le goniomètre de M. Babinet, et n'ayant

pas de cercle divisé. L'appareil représenté (fig. 14), et disposé comme l'ont indiqué MM. Kirchhoff et Bunsen, est généralement employé.

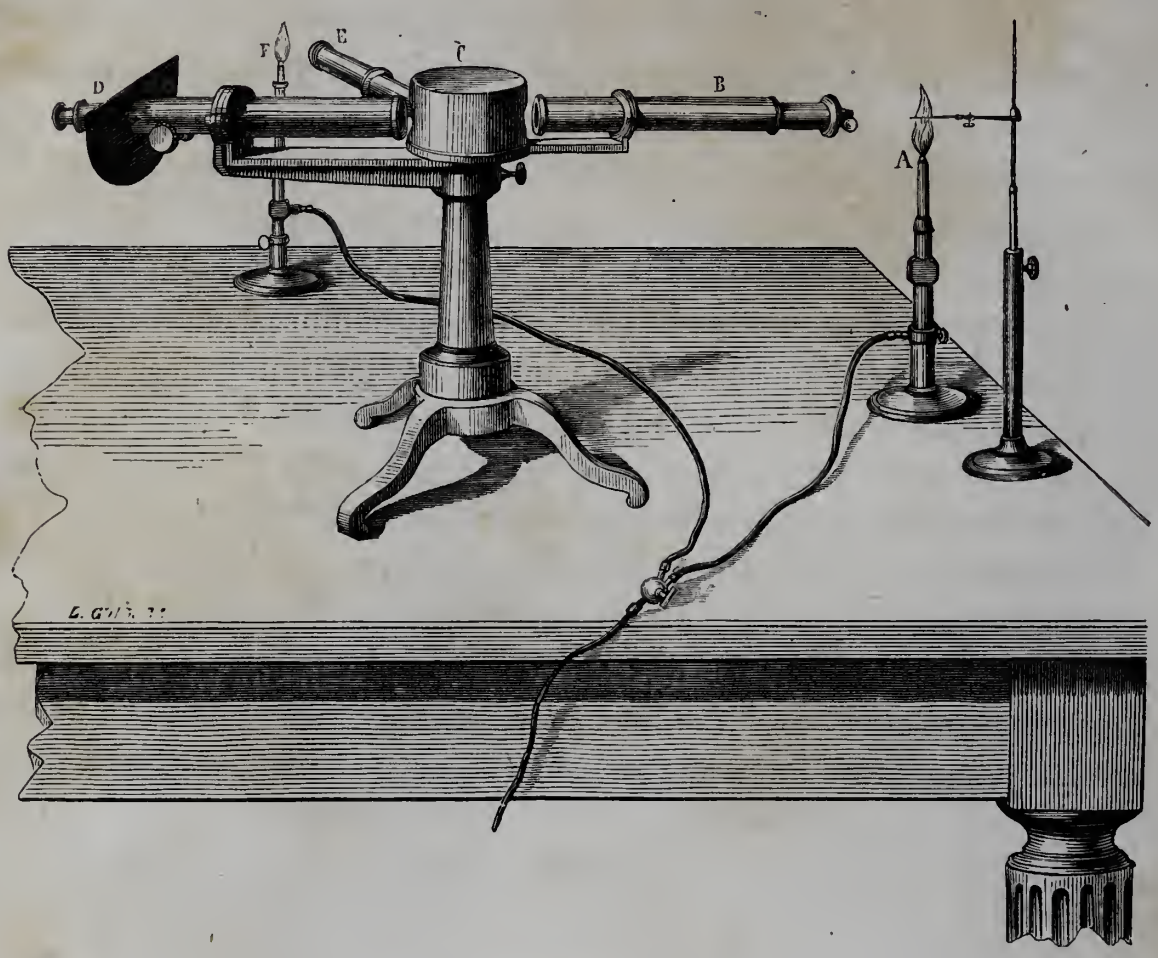



Fig. 14.

En C se trouve un prisme en flint: il est couvert d'une boîte cylindrique en cuivre, percée d'ouvertures en face des lunettes B, D et E, afin d'éliminer les rayons de lumière diffuse qui tomberaient de différents côtés sur le prisme. B est une lunette faisant collimateur ; elle porte une fente verticale très-déliée, laquelle, étant au foyer de la lentille de la lunette, rend parallèles les rayons qui viennent tomber sur le prisme ; on peut du reste, avec une vis, faire varier l'ouverture de la fente. Une lunette oculaire D permet de viser cette fente au travers du prisme et du collimateur; elle est portée sur une alidade qui peut recevoir un mouvement de rotation autour de la verticale passant par le prisme C, de façon à faire varier sa position par rapport au prisme. On peut ainsi viser sur telle partie que l'on veut de l'image prismatique.

Une disposition ingénieuse permet à l'observateur de voir en même temps que l'image du spectre produite par une source lumineuse A,

les traits d'un micromètre éclairé qui donne les distances comparatives des diverses raies obscures ou lumineuses. Pour cela ce micromètre est tracé sur une plaque en verre E, et est éclairé par transparence au moyen de la flamme d'une bougie F; il est placé dans le tube E faisant collimateur, et son image est réfléchie sur la face du prisme de flint qui est du côté de l'observateur, de façon à être vue dans la lunette D en même temps que le spectre de la flamme A. Des vis déplacent le micromètre de bas en haut et de côté de manière à faire coïncider telle division que l'on voudra avec une des raies de la lumière que l'on étudie.

A l'extrémité du collimateur B se trouve en face de la fente un petit prisme en verre faisant fonction de miroir et couvrant la moitié de la fente. On peut faire réfléchir, au moyen de ce prisme, les rayons solaires ou les rayons d'une autre source lumineuse, lesquels, pénétrant par la même fente que la lumière A, donnent un second spectre vu en même temps que le premier dans la lunette, et qui se trouve placé au-dessus ou au-dessous, parallèlement à lui, suivant la position du prisme. On peut donc au moyen de cette disposition comparer les parties de même réfrangibilité de deux sources lumineuses et vérifier si des raies occupent les mêmes places dans les deux images, en même temps que le micromètre donne les distances relatives des différentes raies entre elles.

Cet appareil n'offre pas une grande dispersion et ne peut servir quand on veut examiner les positions des raies les plus déliées des sources lumineuses par rapport aux raies du spectre solaire; on a recours alors à des spectroscopes à plusieurs prismes. Celui qui est représenté fig. 15, page suivante, porte six prismes; le collimateur auquel est fixé la fente mobile est en A; un petit prisme en couvre la moitié comme dans l'appareil précédent, et permet de comparer les raies de deux sources de lumière. Les rayons lumineux émis par la source L, traversent le collimateur A, peuvent se réfracter successivement dans les prismes et sont ensuite reçus par la lunette oculaire B. De plus, un système de bras de levier peut déplacer à la fois tous les prismes pour permettre de viser sur telle partie du spectre que l'on veut. L'image d'un micromètre C, éclairé par l, est réfléchie sur la face antérieure du prisme n° 6, qui est devant la lunette oculaire B, et des vis peuvent changer sa position, comme dans le spectroscope décrit plus haut (1).

Les appareils à plusieurs prismes sont destinés à donner une grande dis-

(1) L'appareil figuré ici a été construit avec soin par M. J. Duboscq, et se trouve dans les galeries du Conservatoire impériale des arts et métiers.

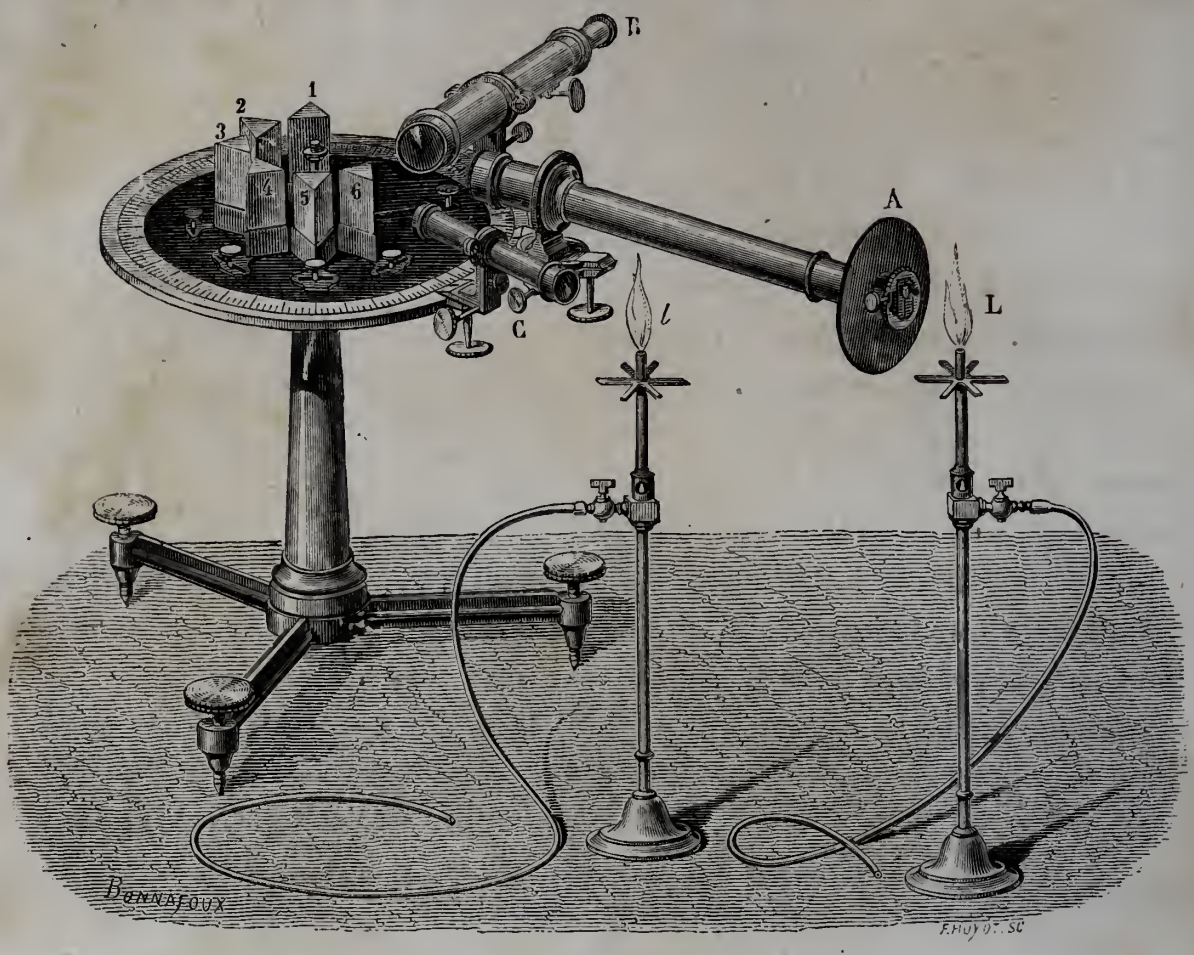



Fig. 15.

persion aux images prismatiques, et l'on a été, comme on l'a vu, jusqu'à former des spectroscopes avec douze prismes en sulfure de carbone.

On a construit des appareils à vision directe qui ne donnent pas une dispersion aussi grande que ces spectroscopes, mais qui sont très-commodes, surtout pour les observations astronomiques, alors que les intensités lumineuses ne sont pas très-considérables et qu'il est plus facile de placer l'instrument dans la direction même où la vision s'opère. Parmi ces appareils, j'indiquerai ceux qui sont fondés sur l'emploi des systèmes de prismes représentés fig. 16 et fig. 17.

M. Amici (1) a eu l'idée, pour rendre plus faciles les observations du spectre, d'associer deux prismes de crown à un prisme de flint compris entre eux, ce dernier ayant un angle de 90° opposé à ceux des deux autres prismes. On peut arriver à donner à ceux-ci un angle tel que le faisceau incident ressorte à peu près parallèlement à lui-même et soit dispersé, c'est-à-dire donne l'image du spectre.

(1) Donati, *Museo Fiorentino*, vol. 1, série seconde, 1860.

M. Janssen (1) a utilisé cette disposition dans la construction d'un spectroscope portatif à vision directe formant une petite lunette. Le système de prismes qui est placé dans l'axe de l'appareil est représenté fig. 16. Il se compose de cinq prismes; deux en flint d'un angle de 90°, BCD, DEF, et 3 en crown ABC, CDE, EFG. D'après la forme du système, le prisme en crown CDE compris entre les deux flints a un angle de 90° en D et les deux angles en C et en E sont de 45°. Ainsi les trois prismes centraux ont les mêmes angles. Les deux crowns extrêmes ABC, EFG ont en A et en G des angles de 54°; en B et en F des angles de 81°; et en C et en E des angles de 45°. Les angles des prismes extrêmes doivent être un peu corrigés suivant l'indice de réfraction du crown employé, et l'on arrive aisément à observer que la transmission du faisceau lumineux se fait au travers du système en même temps que sa dispersion sans aucune déviation de la partie centrale. L'emploi de deux prismes de flint au lieu d'un seul augmente la dispersion du faisceau, sans diminuer beaucoup l'intensité lumineuse à cause des faibles pertes dues aux réflexions intérieures : aussi cet appareil est-il employé avec avantage pour être placé dans l'oculaire des lunettes à l'aide desquelles on observe les spectres lumineux des astres.

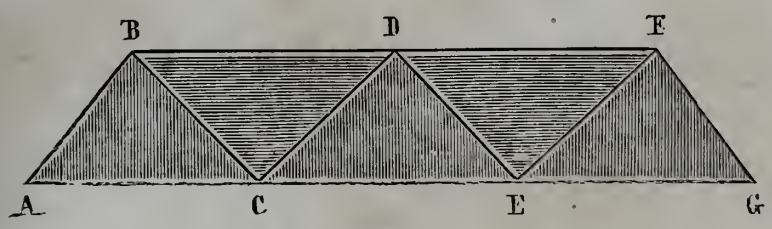


Fig. 16.

Le père Secchi (2), dans ses recherches sur la composition de la lumière des astres, dont il a été question plus haut, page 136, s'est servi d'un prisme de ce genre à vision directe. La dispersion était telle que la distance angulaire des deux lignes B et C était de 20′, et que celle de B à H était de 6° 51′; ainsi l'étendue visible du spectre occupait environ 7°, c'est-à-dire que le pouvoir dispersif de ce système était presque double de celui d'un prisme de flint ordinaire d'un angle de 60°.

M. J. Herschell a proposé la disposition suivante (3) pour réfracter un faisceau de rayons lumineux sans le dévier, à l'aide d'un ou deux prismes

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 55, p. 576.
(2) *Id.*, t. 63, pages 364 et 621.
(3) Journal *les Mondes*, t. 7, p. 132, janvier 1865.

formés d'une seule substance. Soit ABC, fig. 17, un prisme à angle droit en B, tel que le plus petit angle A donne sin. 2 A $= 1 - \frac{1}{n^2}$, $n$ étant l'indice de réfraction moyen ou correspondant au jaune ; pour le flint ordinaire A est à peu près égal à 20°. Un faisceau émané d'une source L tombant sur la face AB sous un angle de 45° se réfracte, puis se réfléchit totalement en $a$ et en $b$, et ressort parallèlement à la direction incidente; il est donc dispersé sans être dévié.

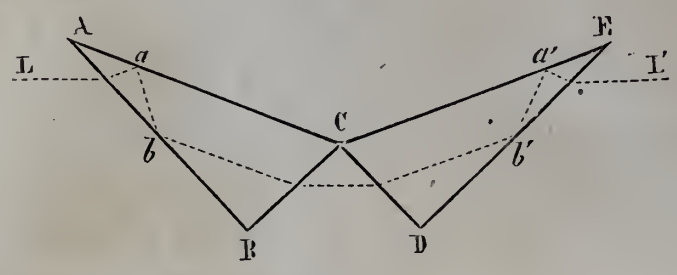


Fig. 17.

Si deux prismes semblables ABC, EDC, sont placés de manière à faire près du plus grand angle aigu C un angle de 90°, alors un rayon incident L sur une face, sous un angle de 45°, se réfracte et se réfléchit totalement deux fois dans chaque prisme, ou quatre fois en totalité en $a\ b\ b'\ a'$ et ressort dans la même direction que l'incidence en L'.

Cette disposition est très-ingénieuse, mais ne donne pas une dispersion aussi grande que la réunion des prismes indiquée plus haut.

§ 2. *Analyse par réfraction de la lumière des flammes. Raies brillantes.*

Si la combustion lente dans quelques circonstances particulières donne lieu à une émission lumineuse assez faible, on peut dire que toute combustion vive produit un dégagement considérable de chaleur et de lumière. La production de la lumière dans ce cas est une des conséquences de l'élévation de la température et est due à l'incandescence des particules des corps; aussi, suivant l'élévation de température, la nature des composés formés ainsi que celle des éléments qui se trouvent en présence, l'intensité lumineuse est différente.

On ne peut estimer *à priori* la température à laquelle s'élèvent les composés dans des réactions aussi vives que les combustions ; on peut bien évaluer les quantités de chaleur produites, mais, ne connaissant pas les changements des capacités calorifiques des corps à mesure que la température est plus élevée ainsi que les effets résultant de la dilatation et des changements moléculaires qui peuvent se manifester, on ne peut arriver qu'à des évaluations incertaines si l'on veut déduire de ces

données la température observée lors de ces réactions : c'est à l'expérience seule à décider. On a vu dans le livre III, page 121, comment on pouvait estimer approximativement ces températures.

Quand les composés formés dans la combustion sont solides et opaques, à égalité de température, la quantité de lumière est la plus grande possible. Quand les composés sont gazeux, alors l'intensité lumineuse peut être beaucoup plus faible : les exemples qui ont été donnés dans le livre précédent suffisent pour établir cette proposition. Mais si les corps solides, liquides ou gazeux portés à l'incandescence émettent une lumière qui est d'autant plus vive que la température est plus élevée, avec les solides et les liquides il n'y a en général de différence que dans l'intensité lumineuse, et si l'on étudie la composition des rayons réfractés, elle indique un spectre continu sans solutions de continuité; avec les gaz incandescents, c'est-à-dire avec les flammes, il n'en est plus de même, et la composition lumineuse dépend de la nature des composés qui constituent la flamme. Alors l'analyse prismatique indique des solutions de continuité et des intervalles ou des raies brillantes.

On a vu précédemment quels avaient été les travaux relatifs aux raies ou lignes noires du spectre solaire, et qui avaient paru depuis les recherches de Wollaston et de Fraünhofer. Ce dernier avait remarqué que la lumière des lampes donnait des lignes lumineuses très-déliées, pareilles en grosseur et en distance aux deux lignes noires D du spectre lumineux solaire ; il observa aussi que la lumière électrique obtenue comme on l'indiquera dans le livre suivant présentait des lignes brillantes au lieu de raies noires.

M. J. Herschell en 1822 (1) décrivit les spectres des flammes colorées par les sels de chaux, de strontiane et de cuivre, et indiqua entre autres la raie brillante orangée donnée par le chlorure de strontium. A la même époque, M. Brewster, s'occupant de ce sujet, montra que la flamme de l'alcool salé est d'un beau jaune pur et que les rayons rouges émis par les sels de potasse quand ils se trouvent dans une flamme sont caractéristiques pour ces sels. M. Talbot (2) en 1826 décrivit les lignes brillantes qui existent dans différentes flammes, et émit l'opinion que le spectre prismatique d'une flamme pouvait montrer si elle contenait certaines sub-

(1) *Transactions philosoph. d'Édimbourg*, t. 9, p. 433, 1822.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 62, p. 18. — Herschell, *Traité d'optique*, traduction de M. Quetelet, t. 1, page 316, et t. 2, page 454.

stances qui autrement ne sauraient être découvertes que par une longue analyse chimique.

M. Brewster continua à s'occuper de cette question ayant en vue l'explication des raies noires du spectre solaire et la recherche d'un principe d'analyse chimique d'après lequel les corps simples pourraient être distingués par leur action sur certaines parties du spectre. En 1833 (1), comme on l'a indiqué précédemment, il exprima l'opinion qu'il y a dans notre atmosphère terrestre des éléments gazeux exerçant une action spécifique pour donner des raies noires d'une réfrangibilité déterminée, et que cette action dans quelques cas est identique avec celle qui est exercée par l'atmosphère solaire. Plus tard (2) il découvrit que les lignes lumineuses et brillantes de quelques flammes correspondent aux lignes qui manquent dans la lumière solaire. Il restait à montrer comment les flammes artificielles produisent des raies brillantes, et comment, si ces corps sont cause des raies que l'on observe dans l'atmosphère solaire, ils donnent des raies noires au lieu de raies brillantes; on verra plus loin quelle peut être l'explication de cette coïncidence.

M. Miller en 1845 (3) a donné la composition des spectres produits par des flammes provenant de la combustion de l'alcool mélangé de divers sels, et M. Swan (4), en s'occupant de la composition de la lumière des flammes des gaz hydrocarburés, a montré quelle était la faible quantité de sel marin nécessaire pour faire apparaître la raie des sels de soude.

On ne doit pas omettre de dire qu'avant ces dernières publications M. Wheatstone en 1835, en analysant la lumière électrique des différents métaux, comme il sera dit dans le livre suivant, démontra que les raies lumineuses dont se compose son spectre variaient avec la nature des électrodes et étaient dues aux particules votatilisées des métaux employés. Depuis, M. Masson, en 1854, et surtout M. Plucker se sont servis des mêmes principes pour étudier les conditions diverses de la décharge électrique dans des gaz à des pressions différentes.

On voit, d'après ces recherches, qu'il était établi que l'analyse prismatique pouvait servir à spécifier la nature des matières existant dans

(1) *Transact. philos. d'Édimbourg*, t. 12, p. 544 et 545.
(2) *Rapport de l'Association britannique*, p. 1842, t. 15.
(3) *Philosoph. mag.*, avril 1845. — *Ann. de Poggend.*, t. 69.
(4) *Transact. d'Edimbourg*, t. 21, p. 411. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 57, p. 363.

les flammes; mais MM. Kirchhoff et Bunsen en 1860 (1) imprimèrent une grande impulsion à l'étude de ces phénomènes en donnant aux procédés d'expérience une rigueur très-grande, et en analysant les conditions diverses dans lesquelles se produisent les raies brillantes des flammes.

Ils se sont appliqués d'abord à montrer l'avantage de l'emploi de l'analyse spectrale pour la recherche des métaux alcalins et terreux, car les autres métaux, comme le fer, le cuivre, etc., donnent des raies tellement nombreuses qu'il faut une étude plus longue pour les distinguer. Avec les métaux alcalins, le nombre des raies est moins grand; ainsi le sodium en vapeur ne donne qu'une double raie correspondants à la raie D; le lithium, deux raies, etc.

Ils ont fait voir que les raies sont d'autant plus visibles que la température de la flamme est plus élevée et son pouvoir éclairant moindre; et, en général, de toutes les combinaisons d'un même métal c'est la plus volatile qui pour une même flamme donne les raies les plus intenses.

Pour s'assurer que le même métal fait toujours apparaître les mêmes raies jusqu'aux plus hautes limites où l'on puisse parvenir, ils se sont même servis de l'étincelle électrique excitée entre des électrodes formées des métaux alcalins dont les sels avaient été étudiés à l'état de vapeur, et ils ont trouvé que ces étincelles donnaient les mêmes raies caractéristiques. Indépendamment de celles-ci, le spectre des étincelles en présente d'autres, résultant en partie de la présence des métaux étrangers dans les électrodes, et de l'atmosphère gazeuse qui est portée à l'incandescence par les étincelles; mais aussi il peut y avoir des raies qui sont très-faibles quand les flammes sont à des températures peu élenées, et qui prennent de l'intensité quand la température est aussi haute que dans la décharge électrique.

D'après leurs recherches, pour être dans les conditions les plus avantageuses à l'analyse chimique, on doit se servir d'un appareil à un prisme et de faible grossissement, comme le spectroscope représenté fig. 14, page 150, sans quoi l'apparence du spectre peut changer et les rapports d'intensité des raies peuvent n'être pas tout à fait semblables. Ils ont même montré que dans les spectres des flammes, quand il y a des raies de différente intensité, si l'on vient à augmenter le pouvoir lumineux de la flamme, ce sont les raies les moins brillantes qui gagnent en in-

(1) *Ann. de Pogg*, t. 110, p. 161. — Id., t. 113, p. 337. — *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, t. 62, p. 452, et t. 64, p. 257. — Id. 4e série, t. 1, page 396.

tensité, mais sans qu'elles puissent égaler les plus brillantes. Il faut donc se tenir dans des limites d'un examen rapide et facile.

Ils ont confirmé l'observation de M. Swan (1) sur les quantités très-minimes de chlorure de sodium qui suffisent pour donner naissance à la raie caractéristique de ce métal. Ainsi en faisant détonner 3 milligr. de chlorate de soude mélangé de sucre de lait, dans une pièce de 60 mètres cubes où l'on observait le spectre avec une lampe à gaz qui ne donnait aucune raie, après quelques minutes ils virent apparaître la raie caractéristique du sodium, et cette raie ne s'effaça qu'après 10 minutes. En considérant qu'il faut une seconde pour observer commodément la réaction, et que pendant ce temps la flamme emploie environ 50 cent. cubes de gaz, lequel ne contenait que 1 vingt millionième de milligr. de sel de soude, on peut calculer que l'œil perçoit distinctement la présence de 1 trois millionième de milligr. de sel de soude.

La sensibilité excessive de cette réaction explique pourquoi tous les corps qui ont subi l'accès de l'air pendant un certain temps donnent naissance à la raie du sodium lorsqu'on les introduit dans la flamme de l'appareil, et pourquoi l'on ne parvient que pour un très-petit nombre de substances à faire disparaître entièrement cette réaction, même après un grand nombre de cristallisations dans des vases en platine.

MM. Kirchhoff et Bunsen dès le début de leurs recherches ont pu voir réaliser leur prévision que la méthode basée sur l'analyse optique pourrait reculer de beaucoup les limites de l'analyse chimique ordinaires ; ils ont en effet découvert qu'en outre du potassium, du sodium et du lithium, il existait deux autres métaux alcalins, bien que ces nouveaux éléments donnent lieu aux mêmes précipités que les sels du potassium et qu'on ne les rencontre qu'en très-petite quantité dans des eaux mères de certaines salines. Ces deux métaux ont reçu les noms de cœsium et de rubidium, d'après les couleurs bleue et rouge que ces métaux donnent aux lignes brillantes caractéristiques de leur image prismatique.

Bientôt après, en suivant cette méthode, M. W. Crookes (2) découvrit l'existence d'un nouveau corps simple, le thallium, que M. Lamy (3) a montré être un métal dont il a décrit les propriétés et les différentes

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 57, p. 363.

(2) *Chemical news*, mars et mai 1861.

(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 54 et 55. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 67, p. 385 et 418.

combinaisons. En outre, MM. Reech et Ritter ont découvert (1), en 1863, l'existence d'un autre métal, l'indium.

Bien des recherches ont été faites sur l'analyse spectrale; mon but n'est pas de les décrire, mais de parler seulement des résultats généraux les plus importants qui ont été obtenus.

Si l'on fait dissoudre dans de l'alcool quelques chlorures très-volatils tels que les chlorures de lithium, de strontium, de sodium, d'antimoine, de cuivre, et que l'on forme avec ces liquides des petites lampes comme les lampes à alcool ordinaires, les flammes qu'elles produisent ont une coloration dépendant de la nature du chlorure qu'elles renferment. Les chlorures de lithium et de strontium donnent des flammes rouges; le chlorure de sodium, une flamme jaune monochromatique qui est d'un usage fréquent dans les expériences d'optique; le chlorure de cuivre, une flamme verte et celui d'antimoine une flamme d'une couleur blanche-verdâtre de teinte livide. Ces flammes offrent les raies lumineuses caractéristiques des différents métaux qu'elles renferment, et peuvent servir à l'étude spectroscopique des substances qui se dissolvent dans l'alcool et se volatilisent dans la flamme des lampes.

Ce mode d'expérimentation n'est applicable qu'à un petit nombre de substances; pour les matières moins volatiles, on se sert de fils de platine que l'on plonge dans une dissolution aqueuse du sel à essayer, et il suffit d'une très-petite quantité de sel portée dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz et comme l'indique la fig. 14, page 150, pour produire les effets que l'on va décrire. Quelquefois l'on se borne à brûler une allumette que l'on a plongée dans la dissolution d'essai.

La planche fig. 18 jointe à ce volume donne l'indication de la position des principales raies obtenues dans la volatilisation des chlorures des métaux alcalins et terreux au moyen de la flamme d'un bec de gaz ainsi que leur couleur.

En haut de la planche se trouve le micromètre dont les traits servent à indiquer les distances des différentes figures entre elles. La première représente le spectre solaire lumineux avec ses principales raies.

Ensuite viennent les figures des images prismatiques données par le cœsium et le rubidium. Le cœsium donne 2 raies bleues $\alpha$, $\beta$, puis d'autres raies vertes et jaunes, parmi lesquelles on distingue 2 raies orangées $\gamma$. Le rubidium donne en outre de deux raies orangées, placées

(1) *Journal für praktische Chemie*, 1863. — Frézénius, *Traité d'analyse chimique*, 1866.

comme les précédentes, deux raies rouges caractéristiques de ce métal et un peu moins réfrangibles que la raie A.

Les figures des spectres du potassium Ka, du sodium Na et du lithium Li sont placées à la suite. Le potassium présente une lumière sans raies caractéristiques dans le vert et le bleu, mais il donne une raie violette et une raie rouge α correspondante à A. Le sodium présente la raie jaune bien connue α correspondante à D, et qui se dédouble comme celle-ci quand la dispersion du prisme est suffisante. Le lithium n'offre qu'une raie rouge-orangée α et une raie jaune β, bien plus faible et plus difficile à distinguer.

Les trois figures qui suivent sont relatives au strontium Sr, au calcium Ca et au barium Ba; elles renferment des raies plus nombreuses que les images prismatiques précédentes. Le strontium donne une raie bleue δ bien tranchée, deux raies orangées et une raie jaune α; du reste, au-dessous de la figure du micromètre, on a indiqué les positions des différentes raies du strontium, ainsi que par l'épaisseur des traits noirs leur intensité approximative. Le calcium offre une large raie jaune-orangée et une large raie verte parmi d'autres lignes jaunes et vertes. Le barium présente plusieurs raies vertes et des raies jaunes. L'image prismatique du thallium Tl donne une raie verte unique α ne correspondant à aucune raie noire du spectre solaire. L'image spectrale de l'indium In, représentée en dernier lieu, est formée de deux raies bleues α et β, la première étant la plus forte.

Le spectre du magnésium, non figuré ici, a plusieurs raies brillantes dont une correspond à la raie triple *b* du spectre solaire. Quant aux métaux tels que le fer, le cuivre, etc., ils donnent des raies lumineuses tellement nombreuses que leurs figures spectrales sont fort compliquées.

Ces figures supposent que les chlorures des métaux sont volatilisés isolément; quand plusieurs d'entre eux existent simultanément dans une flamme, on voit apparaître ensemble les systèmes appartenant aux divers chlorures, mais les figures spectrales des éléments les plus volatils se distinguent les premières.

Dans les images prismatiques dont on vient de parler, les lignes sont indiquées comme particulières à l'incandescence de la vapeur du métal alcalin, mais cela suppose que le chlorure soit décomposé ou bien que dans la volatilisation du sel le composé basique donne seul son caractère à la composition du spectre lumineux. Cela est vrai dans la plupart des cas; ainsi, par exemple, la flamme de l'alcool salé donne la même

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170
βγ α δ
A a B C D E b F G H
γ βα
δγ ε βα
α β
α
α β
βγ α δ
α β
ε γ δη α β
α
α β

r
a

c
c
I
a
c
l
c
I
I
c
c
a

d
t
l

i
u
d
l

i
a
d
t
d

raie double jaune D que celle que l'on observe avec la vapeur de sodium; mais plusieurs circonstances viennent modifier les résultats observés avec différents sels, et font que suivant les conditions de l'expérience d'autres raies peuvent apparaître.

D'abord la température a une très-grande influence, et en général plus elle est élevée, non-seulement plus l'intensité lumineuse de chaque raie est grande, mais aussi plus sont nombreuses les raies que l'on peut apercevoir. On a vu plus haut que MM. Kirchhoff et Bunsen avaient même montré que, par un effet d'optique, la visibilité des raies faibles, dont l'épaisseur était plus ou moins grande, croissait plus vite que celle des raies brillantes. Aussi voit-on apparaître de nouvelles raies brillantes. quand on emploie la décharge électrique pour volatiliser les métaux et observer l'image réfractée qu'elle présente, la température étant plus élevée que dans les flammes ordinaires; le sodium peut alors à une plus haute température donner d'autres raies que la raie double jaune qui a la réfrangibilité de D (1); le thallium peut également donner d'autres lignes que la ligne verte (2), et l'on verra dans le livre suivant, où l'on étudiera particulièrement les effets provenant du passage des décharges électriques dans les gaz, qu'il est possible que l'incandescence du même gaz raréfié puisse donner des apparences diverses suivant l'intensité des décharges transmises entre les électrodes.

D'un autre côté, les recherches de M. A. Mitscherlich (3) ont montré que les combinaisons d'un même métal, comme les sulfates, chlorures, oxydes, ne donnent pas toujours un spectre, et que quand elles en donnent les raies ne sont pas toujours les mêmes, car ces spectres peuvent être dus, ou au métal lui-même si une portion du sel est décomposée dans la flamme, ou en partie à la combinaison si elle est volatilisée sans être décomposée. D'après cela, on ne saurait conclure l'absence d'un métal de l'absence d'une raie caractéristique de ce métal, car ce dernier pourrait faire partie d'une combinaison qui ne présente pas cette raie. Cependant, avec des sels très-facilement décomposables, comme les chlorures, la plupart des lignes appartiennent à la vapeur du métal lui-même, comme MM. Kirchhoff et Bunsen l'ont prouvé.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 55, p. 334.
(2) Miller, *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 69, p. 507.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 69, p. 169 (1863). — *Id.*, 4e série, t. 2, p. 497.

Ces recherches ont été confirmées par celles de M. Diacon (1). Elles montrent que tout en attachant une très-grande importance à l'analyse spectrale on ne peut en tirer des conclusions certaines, quant à l'existence des matières que l'on recherche, qu'en variant les conditions expérimentales pour connaître l'influence de la nature des éléments en présence sur la composition de l'image prismatique.

### § 3. *Causes des raies du spectre solaire.*

M. Kirchhoff (2) a montré que si l'on admettait pour toute espèce de rayons le principe de l'égalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un corps à la même température, il était facile d'expliquer pour quel motif une flamme donnait des raies brillantes quand elle agissait comme source de lumière, et des raies obscures par rapport aux parties voisines quand, agissant comme écran, elle était placée devant une source de lumière d'une intensité plus grande. Dans le premier cas en effet, les raies brillantes, sont dues au plus grand pouvoir émissif de la flamme pour les rayons d'une réfrangibilité déterminée. Dans le second cas la flamme, servant d'écran, en vertu de son pouvoir absorbant plus grand pour les rayons de même réfrangibilité que ceux qui sont émis en plus grande abondance, agit par absorption sur ces rayons émis par la source lumineuse placée derrière; et comme de chaque côté les autres rayons émis par les deux sources lumineuses n'éprouvent pas de changements notables, l'intensité lumineuse de ces parties reste à peu près la même, tandis qu'il y a diminution dans les régions où l'absorption a lieu, et il en résulte par contraste des raies obscures à la place des premières raies brillantes.

Ce principe était déjà admis pour la chaleur rayonnante; il l'a prouvé pour la lumière en montrant que la flamme de l'alcool salé, qui donne une raie brillante quand on analyse la lumière de cette flamme, donne une raie obscure quand on place derrière la flamme une flamme plus vive, comme celle du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. Il y a alors renversement de la raie, puisqu'à la même place où l'on voyait une raie brillante on voit une raie obscure; c'est donc par un effet de contraste que le second effet se produit. De même, si dans la flamme non éclairante

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 4e série, t. 6, p. 6 (1865).

(2) *Mém. de l'Acad. de Berlin*, 1859, p. 662; *id.*, 1861. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 58, p. 254; *id.*, 3e série, t. 68, p. 5.

d'un bec de gaz on introduit du chlorure de lithium, le spectre de cette flamme présente la raie rouge indiquée précédemment qui correspond à peu près au milieu de l'espace de B à C; mais si l'on fait traverser la flamme par des rayons solaires, on voit apparaître une raie obscure nouvelle dans le spectre solaire, laquelle occupe exactement la position de la raie brillante dont il s'agit.

M. Kirchhoff put alors expliquer la cause de la coïncidence des raies brillantes de certaines flammes avec les raies noires du spectre solaire. C'est que, dit-il, dans l'atmosphère solaire les substances métalliques, les matières volatilisées se trouvent en incandescence, et ces masses gazeuses formant écrans par rapport à des parties plus lumineuses, les mêmes effets ont lieu comme précédemment, et il y a renversement des raies que donneraient ces mêmes matières agissant comme sources lumineuses ; on a donc des raies obscures au lieu de raies brillantes.

D'après cette supposition, l'expérience par laquelle M. Fizeau (1) a montré que la lumière du sodium brûlant dans l'air donne au commencement de la combustion, par l'analyse prismatique, une double raie noire qui est bientôt remplacée par une double raie jaune située à la même place, tient à ce que, lors de la plus grande ignition du sodium, la partie la plus brillante de la flamme se trouve entourée de vapeur de sodium à plus basse température, et qu'à la fin de l'expérience toute la flamme a sensiblement la même intensité lumineuse.

Le phénomène de renversement des raies n'avait été observé jusqu'ici qu'avec des flammes et les raies ou bandes d'absorption, c'est-à-dire les raies ou bandes obscures présentées par les dissolutions métalliques quand on plaçait celles-ci sur le trajet des rayons lumineux avant leur réfraction, et provenant de l'absorption de certains rayons par ces dissolutions, ne correspondaient pas en général aux raies ou lignes lumineuses données par les substances volatilisées dans une flamme. En effet, le principe de l'égalité des pouvoirs émissifs et absorbants d'un même corps pour un même groupe de rayons n'est relatif qu'à une même température ; mais il peut se faire que des corps présentent pour des rayons d'une même réfrangibilité le même pouvoir absorbant à diverses températures, et alors les mêmes raies ou bandes d'absorption se produiraient entre des limites calorifiques différentes.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 54, p. 493.

MM. J. Bahr et Bunsen (1) ont reconnu récemment qu'il en était ainsi avec les dissolutions des sels d'erbium; ces liquides placés sur le trajet des rayons réfractés donnent un spectre offrant huit bandes obscures (deux rouges, quatre vertes et deux bleues) dont les positions coïncident exactement avec les huit lignes lumineuses que donne l'erbine incandescente placée dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz. Ainsi l'erbine offre l'exemple d'une substance pour laquelle, par exception, le renversement des raies brillantes en raies obscures peut être effectué de la manière la plus simple, car avec les composés de cette substance les positions des bandes spectrales restent les mêmes à basse ou à haute température.

MM. Bahr et Bunsen ont reconnu en même temps que l'erbine se distingue de tous les corps actuellement connus par ses propriétés optiques : Quand on calcine cet oxyde dans la flamme d'un chalumeau à gaz il ne se fond pas, il répand une lumière verte et s'entoure d'une auréole de même couleur quand la température est très-élevée, et donne par irradiation un spectre à raies lumineuses. MM. Bahr et Bunsen ont remarqué encore qu'en humectant un morceau poreux d'erbine avec une solution d'acide phosphorique concentré et en calcinant de nouveau la substance on augmente le pouvoir émissif de la matière et que l'effet optique est encore plus marqué. Si l'erbine ne présente aucune trace de volatilisation, comme le supposent MM. Bahr et Bunsen, ce serait le premier exemple d'une substance non volatile donnant par irradiation un spectre lumineux discontinu, puisque nous avons vu, page 104, que les solides et les liquides incandescents présentent une image prismatique continue et sans solutions de continuité, et que les gaz seuls jusqu'ici ont donné des spectres à bandes lumineuses. Mais cette exception mérite confirmation.

M. Kirchhoff, d'après la coïncidence que M. Brewster avait observée entre les positions des raies brillantes de certaines flammes, et celle de raies noires du spectre, et en remarquant que, dans l'analyse par réfraction de la lumière solaire et de celle d'une flamme dans laquelle le fer était en ignition, il y avait également une coïncidence parfaite entre les raies brillantes de fer et des raies obscures du spectre solaire, M. Kirchhoff pensa qu'il y avait la plus grande probabilité pour que ces dernières fussent dues à la présence du fer en vapeur dans l'atmosphère solaire.

(1) *Ann. der Chemie und Pharm.*, t. 137, p. 1 (nouvelle série, t. 61). *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 9, p. 484.

Il trouva en outre qu'il y avait coïncidence entre les raies brillantes des flammes de plusieurs métaux et plusieurs des raies du spectre, et que d'autres flammes ne paraissaient pas présenter ce résultat. D'après lui, il se trouverait dans l'atmosphère solaire du fer, du magnésium, du sodium, du potassium, du calcium, du chrome, du nickel et peut-être du cobalt, de l'aluminium, du barium, du cuivre, du manganèse et du zinc; mais l'atmosphère solaire ne renfermerait pas d'or, d'argent, de plomb, d'étain, d'antimoine, de cadmium, d'arsénic, de mercure, de lithium, de strontium, de silicium, ni de thallium.

Il est extrêmement remarquable que l'on ait pu s'élever par des observations d'analyse de lumière à la probabilité de la constitution chimique de l'atmosphère solaire; mais on a vu, d'après ce qui a été dit page 161, que l'absence de raies ne pouvait pas indiquer qu'une matière n'existât pas à l'état d'incandescence dans une flamme; d'un autre côté, il peut se faire qu'il y ait des combinaisons entre les éléments qui constituent l'atmosphère solaire, et si tous les éléments ne sont pas séparés, il pourrait y avoir des raies correspondantes à ces combinaisons, et non pas aux bases métalliques elles-mêmes. Mais la température est si élevée que peut-être les éléments sont tous désunis.

Des considérations du même ordre permettraient de rendre compte des raies observées dans la lumière des astres, et dont il a été question page 134, et la diversité des matières qui se trouvent dans leurs atmosphères expliquerait pour quel motif les raies ne sont pas toutes les mêmes que les raies solaires.

Un certain nombre des raies noires du spectre solaire sont dues à la présence de l'air atmosphérique, car on a vu au commencement de ce livre, page 133, que l'atmosphère terrestre peut agir par absorption pour donner des solutions de continuité aux images prismatiques. On a désigné ces bandes et ces raies sous le nom de raies atmosphériques ou telluriques, et l'on a réservé le nom de raies solaires à celles que l'on observe en analysant le spectre solaire, et qui dépendent de la constitution même de cet astre.

Je dois faire remarquer, en terminant ce livre, que d'autres causes que les absorptions exercées par les masses gazeuses peuvent produire des raies noires analogues aux raies du spectre solaire. On verra en effet livre VI (1) que dans l'analyse par réfraction des rayons émis par les

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 57, p. 54. *Leçons faites à la Société chim.*, 1861, p. 193.

corps phosphorescents on observe avec les corps solides, à la température ordinaire, des effets de ce genre. Sans vouloir prétendre que des conditions analogues puissent se présenter dans des sources d'origine météorique où l'incandescence est d'ailleurs manifeste, quand on voit des causes si diverses et des actions exercées à des températures si différentes donner lieu au phénomène dont il s'agit ici, on ne doit pas se hâter de déduire des conclusions trop absolues des recherches, d'ailleurs fort importantes, faites sur l'analyse spectrale.

# LIVRE V.

## EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR L'ÉLECTRICITÉ.

## CHAPITRE PREMIER.

### Étincelles électriques.

§ 1. *Lueurs et étincelles. — Influence de la nature des gaz et des conducteurs.*

Toutes les fois que les électricités accumulées sur des corps à distance ont une tension suffisante, elles traversent le milieu qui les sépare, et cette réunion a lieu avec accompagnement de lumière, c'est-à-dire sous forme d'étincelles; si la quantité d'électricité qui passe se renouvelle continuellement, il peut en résulter un arc comme celui que l'on obtient avec une pile voltaïque. L'intensité et la composition de la lumière qui se produit dépend non-seulement de la quantité d'électricité qui passe, ainsi que de la forme et de la nature des conducteurs que l'on appelle des électrodes, et entre lesquels les décharges ont lieu, mais encore de la nature, de la température, et de la force élastique des milieux qui environnent ces mêmes conducteurs.

Les recherches qui ont été faites sur l'électricité ont montré que sa transmission dans les corps ne pouvait avoir lieu sans la présence de particules matérielles; ainsi, d'après ce principe, dans le vide parfait, la propagation de l'électricité n'aurait pas lieu; mais, distinction importante à établir, les influences magnétiques comme les actions électro-dynamiques des courants pourraient s'exercer. On assimile ainsi le passage de l'électricité dans les gaz à celui de cet agent dans les métaux et dans les liquides. L'expérience du reste a prononcé (1), et j'ai

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 39, p. 355, 1853.

prouvé que dans des circonstances données de température et de pression on pouvait considérer les courants électriques, même à faible tension, comme traversant les gaz ainsi qu'ils traversent les liquides et les solides conducteurs. D'un autre côté, quand on raréfie l'air au plus haut point où on puisse le faire et comme Davy l'a montré, la transmission de l'électricité devient de plus en plus difficile, de façon à faire penser que l'électricité ne se propagerait pas dans le vide parfait (1).

On a démontré que toutes les fois que l'électricité passe dans un corps il y a élévation de température, et si cette élévation de température est suffisante il y a incandescence. Tel est l'effet qui se produit quand l'électricité traverse un fil de platine; si la quantité d'électricité est suffisante, ce fil est porté au rouge et peut arriver jusqu'à la fusion. Dans les gaz, il en est de même; le passage de l'électricité rend incandescentes les particules qui servent à transmettre l'électricité, et l'incandescence est cause de la lumière observée. Cet effet, comme on va voir, peut résulter, soit de l'incandescence du milieu ambiant, de l'air généralement, soit des particules volatilisées provenant des conducteurs et pouvant servir à transmettre l'électricité.

La lumière électrique apparaît dans l'air aussitôt que l'électricité a une tension suffisante pour se porter sur les corps voisins; ainsi l'ambre, la gomme laque, le verre, certaines pierres précieuses étant frottés, quand ils sont dans l'obscurité et qu'on en approche la main, présentent des petites étincelles dues à l'électricité qui traverse l'air.

On observe un dégagement de lumière lors du frottement du mercure contre le verre dans l'intérieur d'un tube barométrique. Ce fait a été découvert par Picard, en 1676 (2). On n'en reconnut pas d'abord la cause, mais Hawksbée prouva qu'il rentrait dans les effets ordinaires de frottement. On trouve dans les cabinets de physique un petit appareil qui montre le phénomène avec simplicité : il se compose d'une petite roue en verre (fig. 19), formée par un tube recourbé et renflé de distance en distance. Ce tube, avant d'être fermé, fait partie

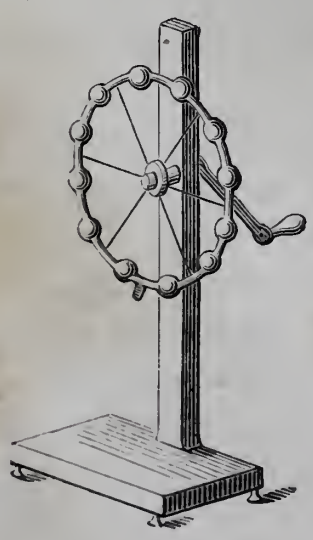


Fig. 19.

(1) Voir les expériences de M. Gassiot, celles de M. Delarive, *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 56, p. 669; ainsi que celle de MM. Plucker et Hittorf, *Philos. transact.*, t. 155.

(2) *Mém. de l'Acad. des sciences de Paris*, t. 2, p. 125.

d'un tube barométrique, et quand on soude au chalumeau la portion du tube auquel il tient, on a soin d'y laisser une petite quantité de mercure. Une fois ce tube circulaire fermé, il est donc vide d'air, et contient un peu de mercure. On adapte ce tube à un axe muni d'une manivelle, et ce système forme une petite roue que l'on met en mouvement avec la main. Si on la fait tourner ainsi dans l'obscurité, on voit une lueur se produire dans l'intérieur du tube, et même il éclate des petites étincelles là où le frottement est le plus grand.

Les lueurs qui se voient autour des conducteurs et du verre d'une machine électrique ordinaire ont la même origine; il en est également de même des apparences lumineuses qui se produisent quelquefois en temps d'orage à l'extrémité des corps conducteurs, comme à la pointe des paratonnerres (1).

Lorsqu'on approche la main d'un des conducteurs d'une machine électrique, si la distance est un peu grande on aperçoit des traînées lumineuses allant en s'épanouissant et qui forment ce que l'on nomme des aigrettes; ce sont des petites étincelles excitées entre les particules de l'air. Mais si la distance entre le corps conducteur et la machine électrique est moindre, alors apparaît l'étincelle ou cette ligne de feu brillante, qui est l'image de la foudre.

L'étincelle est plus ou moins vive suivant les circonstances; entre deux conducteurs métalliques dont l'un touche à une machine électrique, l'étincelle a moins d'éclat que si l'on se sert d'une jarre électrique ou d'un condensateur; dans ce dernier cas, l'étincelle est plus courte, mais beaucoup plus brillante. Cette étincelle est due à l'incandescence temporaire des particules matérielles qui transmettent l'électricité; c'est pour ainsi dire une file de particules incandescentes, et il se produit dans le gaz, comme on l'a déjà dit, le même effet que dans des fils métalliques parcourus par l'électricité.

Il est facile de démontrer l'influence des milieux ambiants et de leur densité sur la nature et l'intensité des étincelles. On peut d'abord citer une expérience curieuse de Davy (2) : un tube A B C, fig. 20, auquel est adapté un robinet permet de raréfier l'air à l'intérieur. Il est traversé en A par une tige de platine *m* soudée dans le tube. Du mercure, au commencement de l'expérience, remplit la partie A B. En ra-

(1) Becquerel, *Traité d'électricité* en 7 vol., t. 1. — Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 1er, p. 412.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 20, p. 168, 1821.

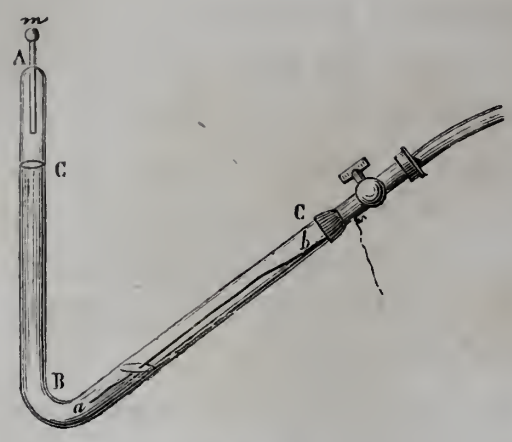


Fig. 20.

réfiant l'air du tube, on force la colonne mercurielle A B à descendre, et entre le mercure et la tige de platine *m* il se forme le vide barométrique. On comprend dès lors qu'en faisant communiquer *m* avec un corps électrisé ou avec le bouton d'une bouteille de Leyde, si un fil de platine *b a*, attaché au robinet, plonge en *a* dans le mercure et fait communiquer celui-ci avec le sol, on pourra faire passer l'électricité au travers de l'espace vide.

Cet appareil peut se placer dans un vase rempli d'alliage fusible qui élève sa température, ou bien être plongé dans un mélange réfrigérant. Lorsqu'on élève la température du mercure dans le vide barométrique, la lumière se montre d'une couleur verte; en chauffant graduellement jusqu'à l'ébullition du mercure, la décharge d'une batterie de quelques bocaux y produit une lumière très-éclatante, tandis qu'en refroidissant le mercure on l'affaiblit peu à peu, et tellement, qu'à 20 degrés au-dessous de zéro la lumière est si faible qu'elle n'est visible que dans une obscurité très-profonde.

En introduisant dans le vide mercuriel la plus petite quantité d'air, la couleur ordinaire change du vert au vert de mer; par de nouvelles additions, elle passe au bleu et au pourpre. En remplaçant le mercure par de l'alliage fusible afin de ne pas avoir sensiblement de matière pondérable dans le vide, la lumière est pâle, et d'un jaune paille. Lorsque le vide est fait sur l'huile d'olive et le chlorure d'antimoine, la lumière dans le dernier cas est plus marquée qu'avec l'huile. On voit par là que l'intensité lumineuse dépend de la quantité de matière pondérable à travers laquelle les décharges sont transmises.

Si l'on fait éclater des étincelles dans différents gaz à la même pression, les effets que l'on observe montrent que ces gaz exercent une influence sur l'effet produit. Dans l'air, à la pression ordinaire, les étincelles ont une lumière intense et une couleur bleue bien connue; on aperçoit souvent des parties claires ou obscures dans le trajet, quand la quantité d'électricité est peu considérable. Dans l'azote, les étincelles sont belles, et ont la même apparence que dans l'air, mais leur couleur est franchement bleue ou pourpre, et elles sont accompagnées d'un son très-

remarquable. Dans l'oxygène, elles sont plus blanches que dans l'air ou dans l'azote, mais aussi brillantes. Dans l'hydrogène, elles ont une belle couleur cramoisie, qui n'est pas due à sa faible densité ; en outre, le son est faible, ce qui est une conséquence des propriétés physiques de ce gaz. Dans le gaz acide carbonique, la couleur est comme dans l'air, mais avec une teinte verte, et les étincelles sont plus irrégulières. Dans le gaz chlorhydrique sec, l'étincelle est presque toujours blanche sans partie obscure. Dans le gaz oxyde de carbone, elle est quelquefois verte, rouge, et tantôt l'un, tantôt l'autre; quelquefois on aperçoit des parties noires dans la ligne de l'étincelle.

Il est facile de montrer, par une expérience très-simple, l'influence des milieux sur la lumière de l'étincelle électrique : on prépare plusieurs tubes, de façon à pouvoir y introduire des gaz différents, et à faire éclater des étincelles dans ces gaz à l'aide de fils de platine soudés au travers des parois. On place plusieurs de ces tubes à côté l'un de l'autre en A, A′, A″, fig. 21, de manière que le fil de platine *b* du premier touche le fil *a′* du second, que *b′* du second touche *a″* du troisième, etc. On fait communiquer le fil *a* avec une boule en cuivre isolée B, et le fil *b″* avec le sol; si alors on fait éclater une série d'étincelles entre la boule B et le conducteur d'une machine électrique M, quand la distance entre B et M est suffisante, à chaque décharge il éclatera simultanément une étincelle dans chaque tube A, A′, A″. De plus, ces étincelles seront données par la même quantité d'électricité et auront la même longueur, si les fils de platine sont semblablement placés dans les tubes. Il est nécessaire, dans ces expériences, de faire éclater la décharge entre une boule B et le conducteur d'une machine, sans cela les étincelles ne passeraient pas en approchant simplement les fils de platine des conducteurs.

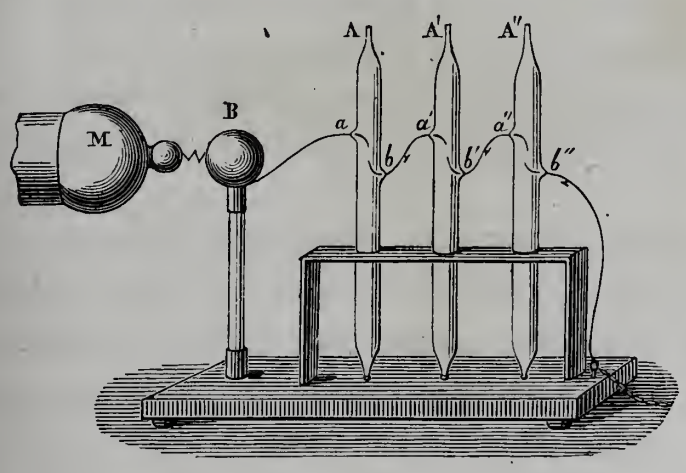


Fig. 21.

Si les tubes A, A′, A″ sont pleins d'air, les étincelles ont le même éclat; si le premier est rempli d'hydrogène, le deuxième de chlore, le

troisième d'oxygène, on observe les effets qui ont été indiqués précédemment, c'est-à-dire que dans l'hydrogène la lumière de l'étincelle est rouge pourpre, dans le chlore verdâtre, dans l'oxygène plus blanche. Les autres gaz donneraient des teintes différentes, comme on l'a dit plus haut. Ainsi la lumière devient blanche et brillante dans un gaze dont la densité est grande, tandis qu'elle s'affaiblit ou prend une teinte rougeâtre dans un milieu dont la densité est plus faible.

Les corps entre lesquels la décharge éclate ont également une influence très-grande sur l'étincelle. On remarque en général que la lumière électrique est d'autant plus brillante que les corps entre lesquels elle se produit conduisent mieux l'électricité; avec les corps mauvais conducteurs elle s'affaiblit et prend une teinte violacée-rouge. Ces effets dépendent des particules votilisées provenant des conducteurs et qui sont portées à l'incandescence. Fusinieri (1) a observé en effet que toutes les fois que l'étincelle éclate entre des conducteurs métalliques on retrouve après la décharge des traces des métaux sur les surfaces des conducteurs, et là où s'est produite la décharge; ainsi, entre une sphère d'argent et une sphère d'or on voit dans les points où la décharge a éclaté sur l'or des traces d'argent et sur l'argent des traces d'or; il y a donc par le fait de la décharge transport de particules matérielles dans les deux sens.

Ces effets, qui s'observent dans toutes les circonstances où il y a des décharges électriques entre des conducteurs métalliques, se manifestent avec plus ou moins d'intensité suivant les conditions dans lesquelles ces décharges ont lieu, ainsi que suivant la pression et la température du gaz environnant. Dans les gaz raréfiés, comme on le verra plus loin, les particules matérielles provenant des conducteurs sont proportionnellement en moindre quantité, et la lueur électrique est due en grande partie à l'incandescence du milieu gazeux raréfié; dans les gaz à la pression ordinaire, ce sont les parcelles métalliques volatilisées et provenant des conducteurs qui donnent presque tout l'éclat brillant à la lumière de l'étincelle, comme le prouve l'analyse de la lumière électrique dont on donnera plus loin les résultats.

(1) *Journal de Pavie*, 1825, p. 405. — Becquerel, *Traité d'électr.* en 7 vol., t. 3, p. 156.

§ 2. *Photomètre fondé sur l'emploi de l'étincelle électrique.*

Nous venons de voir précédemment que la même quantité d'électricité pouvait donner lieu à des effets différents, suivant la nature des milieux et des conducteurs; mais il était important de pouvoir mesurer l'intensité des étincelles afin de comparer leur puissance lumineuse dans ces diverses circonstances. M. Masson (1) a atteint ce but en faisant usage d'un photomètre électrique dont la construction repose sur le principe suivant :

Un disque de papier sur lequel on a tracé des secteurs noirs et blancs d'égale dimension, se mouvant avec une rapidité suffisante, paraît d'une teinte uniforme et grisâtre si on l'éclaire avec une lumière blanche permanente. Ce phénomène bien connu est dû à la persistance de la sensation lumineuse sur la rétine. Lorsqu'au lieu d'une lumière fixe, on emploie une lumière instantanée pour éclairer les secteurs, on aperçoit le disque comme s'il était fixe, les secteurs n'ayant pu se déplacer sensiblement pendant la durée de la lumière. L'œil apercevant dans ce cas, et avec une grande netteté, tous les détails du disque, l'on peut apprécier quelle est son extrême sensibilité ainsi que la rapidité avec laquelle s'exerce la perception des objets et se forme notre jugement sur leur nature.

Si le disque éclairé par une lumière permanente est subitement illuminé par une lumière instantanée, une étincelle électrique par exemple, on verra, pour une intensité convenable de cette dernière, apparaître les secteurs. Si l'on affaiblit successivement la lumière instantanée, il arrivera un instant où les secteurs disparaîtront et où le disque paraîtra éclairé d'une teinte uniforme. Dans ce cas, la lumière instantanée est une fraction de la lumière permanente, variable avec l'œil de l'opérateur mais invariable pour un même œil, les circonstances de vision restant les mêmes. En effet, à cause de la persistance de la sensation sur la rétime, la place qu'occupe un secteur noir ne réfléchissant pas la lumière de l'étincelle a conservé l'éclairement primitif du fond; celle qu'occupe un secteur blanc renvoie à l'œil autant de lumière que la première, plus la lumière due à l'étincelle. Quand l'intensité de cette dernière représentera la limite de sensibilité de l'œil de l'observateur, le disque paraîtra uniformément éclairé. Le rapport entre les intensités des éclairements

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 14, p. 129; *id.*, t. 30, page 5.

des secteurs noirs et blancs au moment où l'on cesse de les distinguer peut varier de $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{120}$, suivant la sensibilité de l'œil de l'observateur. On a déjà cité ce résultat dans le livre III, p. 199. Quant au rapport entre l'intensité de la lumière de l'étincelle et celle de la lumière fixe, il dépend des dimensions des secteurs noirs et blancs.

Supposons maintenant que l'observateur qui étudie l'intensité des étincelles se place à une distance fixe du disque éclairé par celles-ci et par la lumière artificielle qui sert de terme de comparaison, et qu'il approche ou éloigne cette lumière artificielle jusqu'à ce qu'il soit arrivé au point où les secteurs ne soient plus distincts sur la roue en mouvement quand l'étincelle éclate, on mesurera simplement la distance de la lumière artificielle à l'écran, et cette distance servira à comparer les intensités lumineuses de l'étincelle avec celles d'autres étincelles produites entre les boules de l'excitateur placé à la même distance du disque.

M. Masson, à l'aide de cet appareil, non-seulement a montré comment l'intensité lumineuse variait avec la distance des conducteurs, les dimensions des condensateurs, etc., mais il a reconnu en outre que lorsque des décharges de batteries produisent de la lumière dans un point d'interruption d'un circuit et de la chaleur dans un fil faisant partie de ce même circuit, les quantités de chaleur sont proportionnelles aux quantités de lumière. Ce résultat est important, en ce qu'il montre la relation qui existe entre la quantité de lumière et la quantité de chaleur produite par le passage d'une même quantité d'électricité au travers des corps.

# CHAPITRE II.

## Lumière électrique dans les gaz raréfiés ou échauffés. — Arc voltaïque.

### § 1. *Lumière dans les gaz raréfiés.*

La pression des gaz ou des vapeurs au milieu desquels les étincelles éclatent a une grande influence sur les effets obtenus. Non-seule-

ment la quantité d'électricité nécessaire pour produire une étincelle d'une longueur constante est sensiblement proportionnelle à la pression du gaz, entre certaines limites bien entendu, mais en outre, s'il faut moins d'électricité pour produire une longue étincelle dans des gaz raréfiés, la lumière électrique donne de grandes aigrettes ou même des lueurs comme l'œuf électrique en offre un exemple.

Cet appareil, qui sera représenté plus loin, fig. 23, se compose d'un ballon de forme ovoïde, dans lequel on peut raréfier l'air à volonté. Deux tiges terminées par des boules passent à frottement dans des boîtes à cuir fixées aux deux extrémités amincies de l'appareil. En mettant une des tiges en communication avec le conducteur d'une machine et l'autre avec le sol, si le vide est fait dans le ballon et qu'on opère dans l'obscurité, on voit un globe de feu de teinte bleuâtre ayant la forme du vase et qui va d'une sphère conductrice à l'autre. Si on fait rentrer un peu d'air, la teinte est plus vive, mais l'espace lumineux est moins grand; avec une pression intérieure plus forte, on aperçoit des coruscations ou des aigrettes allant d'une boule à l'autre; enfin, avec l'air à la pression ordinaire, si les boules sont suffisamment près, il se produit des étincelles.

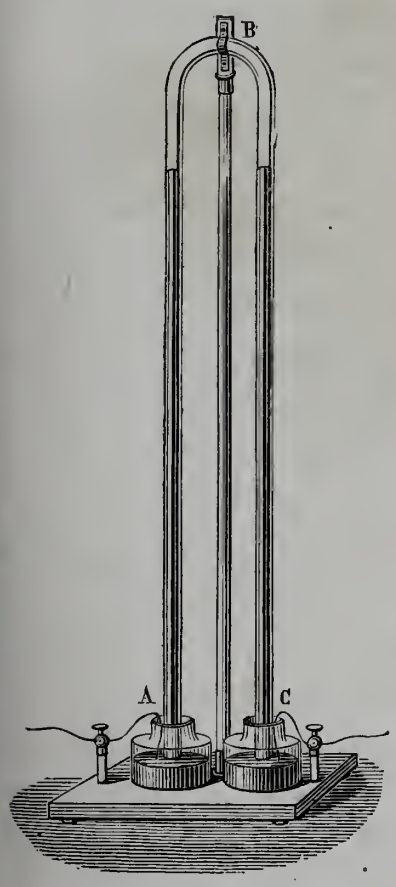


Fig. 22.

Le tube vide employé aussi ordinairement dans les cours de physique présente des effets analogues. On peut également se servir de l'appareil nommé double baromètre représenté ci-contre, fig. 22, et qui montre la lueur produite par suite du passage de l'électricité au travers du vide barométrique dans une partie courbe B.

En examinant au microscope les étincelles qui s'échappent entre une pointe en platine et une lame métallique oscillante d'un appareil d'induction, étincelle provenant du courant d'induction lui-même, on remarque que la pointe devient successivement lumineuse et obscure, suivant la direction imprimée au courant; la pointe est lumineuse quand l'électricité négative débouche

par son extrémité ; quand on excite l'étincelle entre deux fils de fer très-fins, on trouve également que le fil de fer négatif seul rougit et brûle. Si l'on observe ces effets dans cette circonstance, il y a des conditions, comme nous allons le voir, où le pôle positif est aussi lumineux et l'est même davantage que le pôle négatif. En outre, le transport des matières du pôle + au pôle — est intimement lié au mouvement de l'électricité, puisqu'il s'observe également lors du passage des courants électriques au travers des liquides.

Cette inégalité d'intensité lumineuse et de coloration aux deux pôles des appareils d'induction est très-curieuse, en ce qu'elle montre les différences produites suivant le sens du courant ; on peut les obtenir avec beaucoup d'intensité en opérant avec l'appareil d'induction de M. Ruhmkorff, et on peut même suivre ce passage de la succession des étincelles à l'arc voltaïque en approchant graduellement les deux conducteurs qui terminent le fil parcouru par le courant d'induction depuis quelques millimètres où les étincelles se produisent jusqu'à un millimètre ou un demi-millimètre dans l'air où leur succession est si rapide qu'elles constituent un arc ; en même temps les effets de chaleur, de fusion et de transport commencent à se manifester.

Lorsqu'on opère dans les gaz raréfiés, l'arc peut se produire, à une distance assez grande. Pour cela, on dispose sur la platine d'une machine pneumatique un œuf électrique contenant deux boules en cuivre, C, B, fig. 23, et l'on peut raréfier plus ou moins le gaz intérieur ; les deux boules métalliques sont mises en communication avec les extrémités du fil donnant le courant par induction, et par conséquent peuvent être rendues successivement positives ou négatives.

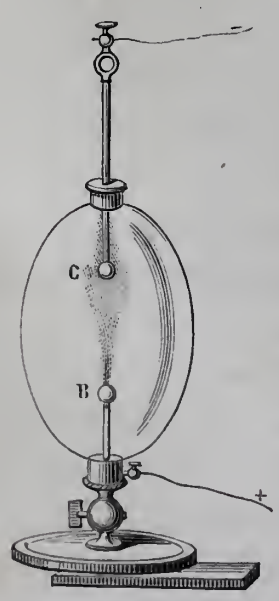


Fig. 23.

Si après avoir fait le vide à 1 ou 2 millimètres de pression on établit la communication entre les tiges et l'appareil, on voit l'arc s'établir aussitôt, même lorsque les boules sont à 2 ou 3 décimètres de distance. En outre, la boule négative C et la tige à laquelle elle est attachée sont entourées d'une auréole lumineuse bleuâtre ; la boule positive B est le point de départ d'une gerbe couleur violette-rougeâtre. L'effet est d'autant plus beau et la gerbe plus large, que le vide fait avec la machine est plus parfait ; jusqu'à une certaine limite

bien entendu, car avec des tubes vides, ou du moins dans lesquels les gaz sont raréfiés autant que possible, l'électricité ne serait plus transmise, comme on l'a déjà énoncé page 168, et l'on ne verrait plus aucune trace lumineuse. La conductibilité du gaz n'augmente donc, lors de la diminution de pression, que jusqu'à une certaine limite, au-delà de laquelle cette conductibilité décroît de façon à devenir nulle dans le vide. Si l'air rentre peu à peu dans l'appareil, l'arc devient d'un moindre diamètre, et la boule négative n'est plus entourée d'une auréole bleuâtre ; enfin, l'électricité peut cesser de passer si la pression intérieure vient à augmenter. La différence dans la manière dont se manifestent les effets lumineux aux deux pôles est frappante.

Lorsque, dans cette expérience, on fait varier la nature des milieux raréfiés, il se produit un phénomène extrêmement remarquable : en mettant dans l'appareil de la vapeur d'essence de térébenthine, puis en raréfiant le gaz avec le plus grand soin, au moment où l'on établit la communication entre l'appareil d'induction et les conducteurs C et B, l'intervalle qui se trouve entre les deux boules paraît lumineux, mais il est séparé en strates perpendiculaires à la ligne qui joint les boules, c'est-à-dire en strates horizontales d'après la disposition de l'appareil ; ces strates sont d'autant plus séparées que le vide est mieux fait. Le phénomène cesse quand il a duré pendant quelques instants ; il se renouvelle en introduisant de nouveau de la vapeur d'essence. Est-ce une polarité des particules d'essence très-raréfiées qui se manifeste? On ne peut répondre quant à présent à cette question, malgré les nombreuses recherches qui ont été faites, et ce point exige de nouvelles expériences pour être éclairci (1).

Les effets lumineux produits par les décharges électriques dans les milieux raréfiés peuvent être observés dans des tubes de verre fermés à la lampe et remplis préalablement des gaz sur lesquels on opère. Des conducteurs, généralement en platine, soudés aux deux extrémités pénètrent dans ces tubes et permettent à l'électricité de passer dans leur intérieur.

M. Geissler a d'abord construit des tubes de ce genre de différentes formes, et depuis on a beaucoup varié leurs dispositions et leurs dimensions ; les effets que l'on peut produire sont aussi très-différents, car en même temps que les gaz plus ou moins raréfiés donnent des teintes et des in-

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 4e série, t. 8, p. 437, 1866.

tensités lumineuses diverses, et que des stratifications apparaissent plus ou moins larges et plus ou moins brillantes, les verres dont sont formés les tubes prennent des teintes bleuâtres ou verdâtres, suivant leur nature, en présentant des effets de phosphorescence qui seront analysés dans le livre suivant. Les verres d'urane surtout donnent une lumière verte très-vive ; suivant l'habileté du souffleur de verre, on peut produire des effets très-variés quand ces tubes sont illuminés dans l'obscurité à l'aide d'un appareil d'induction.

Fig. 36.

Lorsque ces tubes renferment de l'air atmosphérique, ils donnent les belles teintes purpurines de l'azote; avec l'acide carbonique, les hydrogènes carbonés, les tons lumineux sont verdâtres et blanchâtres; les autres gaz donnent des teintes qui dépendent de leur nature et de l'intensité des décharges. On a même proposé de se servir de tubes très-étroits, vivement illuminés à l'intérieur, pour éclairer dans certains cas spéciaux, comme par exemple pour remplacer les lampes des mineurs; on reviendra sur ce sujet dans le livre VI.

Le tube représenté ici, fig. 36, est composé d'une enveloppe en verre ordinaire et d'une partie centrale formée de petites sphères en verre d'urane. Lorsque ce tube ne renferme que de l'air raréfié, les décharges électriques en traversant à l'intérieur des sphères, donnent à celles-ci une lumière verte très-vive, tandis qu'elles ne produisent dans les parties centrales que des nuances rougeâtres et violettes; à l'extrémité négative, on aperçoit une teinte bleue, et près du conducteur positif aboutissent les gerbes rougeâtres qui illuminent l'appareil. L'intérieur offre des stratifications semblables à celles dont il a été question plus haut.

Du reste, on indiquera plus loin différentes dispositions nécessaires pour l'analyse de la lumière produite par le passage de l'électrité dans les gaz raréfiés ainsi que pour l'observation de phénomènes particuliers qui peuvent se présenter.

§ 2. *Arc voltaïque.*

Quand on emploie des conducteurs en charbon de cornue pour conduire le courant électrique provenant d'une pile puissante, on observe au moment du contact de ces conducteurs une émission de lumière d'une vivacité extraordinaire et des effets calorifiques supérieurs à ceux que l'on peut produire par tous les autres moyens physiques, si ce n'est par les décharges électriques obtenues à l'aide des condensateurs. Davy est le premier qui ait fait cette expérience remarquable, que l'on répète facilement aujourd'hui avec une pile de 40 à 50 éléments à acide nitrique.

On peut observer le phénomène dans l'air ou dans le vide. Les appareils destinés à la production de l'arc sont représentés fig. 24 et 25.

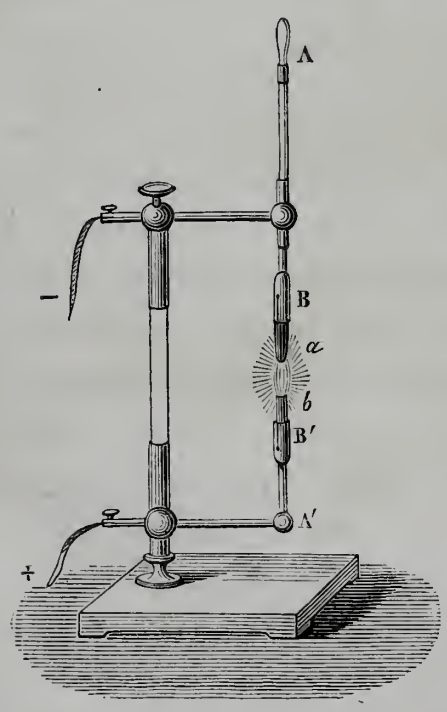


Fig. 24.

Dans le premier appareil, fig. 24, les tiges de cuivre AB, A'B', mises en communication avec les pôles de la pile, contiennent des baguettes en charbon de cornue *a* et *b*, entrant à frottement dans des tubes en cuivre B et B'. La tige supérieure peut se mouvoir à frottement pour amener le contact entre les charbons et pour pouvoir les séparer immédiatement après.

Quand les deux tiges communiquent avec les pôles de la pile, si les charbons sont à une certaine distance l'un de l'autre, le circuit n'est pas fermé et l'électricité ne passe pas; mais une fois les deux cônes de charbon en contact, il se manifeste aux points où ils se touchent une incandescence excessivement vive, et l'on peut les éloigner graduellement l'une de l'autre jusqu'à plusieurs centimètres, suivant le nombre des éléments de la pile. Le courant continue alors à passer, et un globe de flamme auquel on a donné le nom d'arc voltaïque apparaît entre les cônes. Cet arc ne reste pas fixe et est continuellement agité; on doit le considérer comme une succession non interrompue d'étincelles, ou, si l'on veut, comme un courant électrique transmettant dans l'intervalle des deux cônes en charbon des parcelles de

carbone incandescentes. Ce qui montre bien que cet arc est dû à un courant électrique établi à l'aide de particules matérielles, c'est qu'il obéit à l'action d'un aimant, de même que les fils métalliques parcourus par l'électricité.

Quand l'expérience dure depuis quelques instants, en même temps que ce phénomène se produit il y a combustion du charbon, la distance *ab* augmente, et l'arc est bientôt rompu, à moins que l'on ne rapproche les tiges métalliques. Dans le vide il n'en est pas ainsi. L'appareil destiné à produire alors l'arc voltaïque est un œuf électrique, fig. 25, dans les douilles duquel passent les tiges AB, A'B'. La tige A'B' est fixe, mais AB glisse à frottement à la partie supérieure de l'appareil. Quand le courant circule entre les cônes en charbon *a* et *b*, on observe le même phénomène que dans l'air, mais l'arc est plus long, et il n'y a pas combustion du charbon. On remarque seulement que le cône en charbon communiquant avec le pôle positif se creuse, tandis que celui qui communique avec le pôle négatif augmente à son extrémité. Lorsque l'on veut entretenir constant l'arc voltaïque formé dans l'air, il faut donc avoir recours aux régulateurs photo-électriques c'est-à-dire aux appareils du genre de ceux dont on a parlé antérieurement pages 114 et 116, ou bien faire usage du régulateur qui a été imaginé par M. Foucault (1), et à l'aide duquel le rapprochement et l'écartement des charbons polaires s'opère automatiquement d'une manière indépendante.

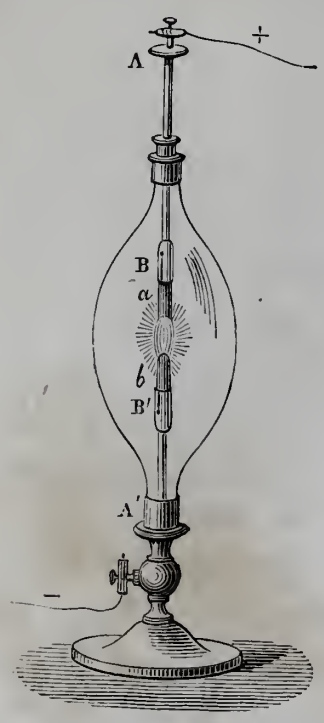


Fig. 25.

La longueur de l'arc voltaïque dépend de l'intensité du courant électrique, c'est-à-dire du nombre de couples dont on fait usage. Despretz, dans des expériences faites avec une pile de 600 éléments, a vu que cette longueur pouvait aller jusqu'à 18 centimètres; entre cette limite et celle de quelques millimètres se trouvent les longueurs d'arc fournis par les piles moins puissantes. Si au lieu d'électrodes en charbon on se sert d'électrodes métalliques, alors la longueur comme la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. 61, p. 1148, 1865.

couleur de l'arc peut subir de grandes modifications, ainsi que cela résulte des observations de M. Delarive (1).

Si l'on étudie la distribution de la lumière dans l'arc voltaïque, elle se trouve inégalement répartie, et vers les pôles elle est beaucoup plus vive qu'au milieu des conducteurs ; le pôle positif est le plus brillant ; aussi la puissance lumineuse de cet arc est-elle due, pour la plus grande partie, à l'irradiation des pointes en charbon et non pas à la flamme qui les entoure.

En général, l'intensité lumineuse augmente peu quand on augmente le nombre des éléments de la pile, mais elle croît rapidement quand on augmente la surface des couples, ou, si l'on veut, la quantité d'électricité. Ainsi, avec la pile de 600 éléments citée plus haut, lorsque ces éléments ont été disposés bout à bout, l'intensité lumineuse a cru de 50 à 100 éléments et de 100 à 600, mais d'une manière peu considérable ; au contraire, quand les éléments ont été réunis en quantité, de manière à doubler, à tripler, etc., leur surface, l'accroissement de l'énergie lumineuse a été alors fort appréciable ; 200 éléments mis en deux séries parallèles de 100 éléments chacune ont éclairé à peu près deux fois plus que 100 éléments simples, et ainsi successivement jusqu'à 600 éléments disposés en six séries parallèles de 100.

On a vu dans le livre III, page 118, quelle était la quantité totale de lumière que pouvait donner l'arc voltaïque dans les conditions ordinaires, par conséquent je n'y reviendrai pas ; je rappellerai seulement qu'avec une pile de 60 à 80 éléments on peut avoir une quantité de lumière équivalente à 1,000, à 1,500 bougies, et qu'en employant soit des piles, soit des machines magnéto-électriques, et en augmentant la quantité d'électricité mise en jeu, on augmenterait la quantité de lumière.

L'arc voltaïque est donc une des sources lumineuses les plus vives que nous puissions produire ; elle ne le cède peut-être qu'aux décharges électriques, mais dont on n'a pas encore étudié les effets sous ce point de vue. Son éclat est moindre que celui du soleil, et l'on verra dans la deuxième partie de cet ouvrage comment on peut comparer les effets chimiques que produisent ces différentes sources de lumière.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. 60, p. 1002.

# CHAPITRE III.

## Composition de la lumière électrique.

---

### § 1. *Lueurs et Étincelles électriques.*

La lumière électrique, comme la lumière solaire et les lumières artificielles, n'est pas simple, et sa composition dépend du milieu où elle se produit et de la nature des corps entre lesquels les décharges ont lieu. Wollaston, en 1802, qui a analysé le premier cette lumière, a reconnu que le spectre résultant de son passage dans un prisme, était formé de bandes colorées dont la composition n'était pas la même que celle de la lumière solaire.

Fraünhofer (1) a trouvé aussi de grandes différences avec le spectre solaire, sous le rapport des raies et des bandes. Pour observer une lumière continue avec l'électricité, il a approché à quelques centimètres de distance deux conducteurs métalliques qu'il a réunis par un fil de verre très-délié. L'un de ces conducteurs a été mis en communication avec une machine électrique et l'autre avec le sol; la lumière qui paraissait sur le fil de verre formait une ligne fine et brillante, et a pu être analysée comme la lumière solaire pénétrant par une fente étroite dans une chambre noire.

Suivant les observations de Fraünhofer, on distingue dans le spectre de la lumière électrique formée dans l'air plusieurs lignes brillantes ou parties très-claires, dont l'une, qui se trouve dans le vert, est d'une clarté pour ainsi dire brillante en comparaison du reste du spectre. L'orangé renferme une ligne moins lumineuse, dont la couleur paraît être la même que celle de la ligne claire du spectre de la flamme d'une lampe. A peu de distance de l'extrémité du spectre, on remarque une ligne d'une teinte sombre; on voit encore facilement dans diverses parties de l'image prismatique quatre lignes bien claires. Fraünhofer a attribué la présence de ces lignes claires à une portion de lumière qui n'a pas été décomposée dans l'acte de la réfraction au travers des

(1) Voir *Mém. de l'Acad. de Munich*, 1814-1815, déjà cités.

prismes, et qui se dessine sur le fond moins éclairé du spectre; mais il a opéré à l'aide d'une source lumineuse peu intense, qui ne lui a pas permis d'analyser complétement le phénomène.

M. Wheatstone (1), en 1835, en observant avec un télescope muni d'un micromètre la composition du spectre de la lumière électrique provenant d'une machine électro-magnétique disposée de manière à donner une étincelle d'induction ne variant pas de position, a obtenu les résultats suivants : le spectre de l'étincelle tirée du mercure consiste en sept bandes définies, séparées les unes des autres par des intervalles obscurs; elles sont composées de deux bandes orangées rapprochées l'une de l'autre, d'une bande vert-brillant, de deux bandes vert-bleuâtre très-rapprochées, d'une bande pourpre très-brillante, et enfin d'une bande violette.

Dans les spectres provenant des étincelles tirées du zinc, du cadmium, du bismuth, du plomb en fusion, M. Wheatstone a reconnu que le nombre, la position et la couleur des raies brillantes varient dans chaque cas. Le spectre du zinc et du cadmium donne une raie rouge qu'on ne trouve pas dans les autres spectres. Les effets ont été les mêmes quelle que fût la source qui fournissait la lumière électrique. En opérant dans le vide barométrique, dans celui de la machine pneumatique ou dans le gaz acide carbonique, etc., les résultats ont été les mêmes que dans l'air et dans l'oxygène.

Ce physicien a reconnu également que l'influence des métaux est tellement marquée que lorsqu'on tire l'étincelle à l'aide d'alliages, on aperçoit simultanément les lignes brillantes qui sont spéciales à chacun des métaux. Ainsi l'intervention de la matière pondérable du conducteur, qui est volatilisée, est bien évidente. Il résulte de là, ce qui a été confirmé du reste par les expériences de Fusinieri dont on a parlé précédemment, que l'étincelle qui traverse l'air entre des conducteurs métalliques ou autres contient toujours des particules matérielles incandescentes.

Masson (2) a étudié la composition de la lumière électrique en variant les sources d'électricité et en excitant les étincelles ou les décharges dans différents milieux et entre des conducteurs de diverse nature. Quelques-uns des résultats qu'il a obtenus sont conformes à ceux dont

(1) *Comptes rendus de l'Association britannique pour l'avanc. des sciences;* Dublin, 1835. — Becquerel, *Traité d'élect.*, en 7 volumes, t. 4, p. 34.

(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 31, p. 295, — t. 45, p. 385.

il vient d'être question; mais en étendant ses recherches il est arrivé à expliquer différentes circonstances de la production de la lumière électrique.

Voici la disposition de l'appareil dont il fait usage :

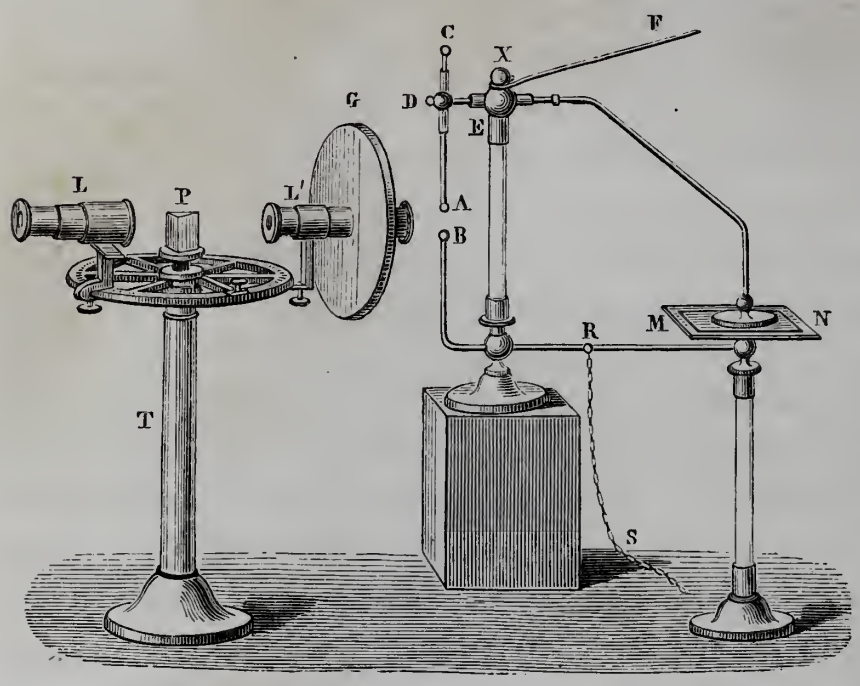



Fig. 26.

L'étincelle électrique dont on étudie la lumière éclate entre deux boules A et B, fig. 26. Ces deux boules sont placées à l'extrémité de deux tiges métalliques isolées et maintenues fixes à l'aide d'un support X; elles sont en relation avec les deux faces d'un condensateur MN, de sorte que si la tige FC touche au conducteur d'une machine électrique et RS avec le sol, le condensateur se chargera continuellement, et l'étincelle n'éclatera entre A et B que lorsque cet appareil sera chargé. Si la machine fournit sans cesse de l'électricité, il se manifestera une succession de décharges entre A et B qui auront toujours même intensité. La lumière électrique traverse un prisme P placé sur un goniomètre T. La lunette L' renferme un collimateur à fente très-étroite, et la lunette L permet à l'observateur d'étudier le spectre successivement dans toute son étendue.

Au moyen de cet appareil non-seulement on peut observer l'étincelle provenant d'une machine électrique ordinaire, mais celle qui résulte de l'emploi d'un appareil d'induction; il suffit de faire communiquer les deux tiges AD et BR avec les deux extrémités du fil induit. En faisant éclater ces décharges entre le cuivre et le mercure, on a une intensité lumineuse très-grande. On peut aussi s'arranger pour produire l'étincelle AB dans un milieu gazeux autre que l'air, ce milieu étant pris à diverses pressions; enfin, il est facile d'adopter une disposi-

tion qui permet de faire éclater les étincelles dans des liquides.

Masson a reconnu que dans l'air la position des raies et leur nombre ne dépend pas sensiblement de l'intensité de l'étincelle, qui rend seulement leur lumière plus vive en augmentant l'étendue du spectre visible. Le nombre des raies et leur position changent avec la nature des métaux entre lesquels éclate l'étincelle, et à chaque métal correspond un spectre particulier, dont l'inspection seule suffit pour déterminer la nature; suivant lui, dans tous les spectres on trouve quatre ou cinq raies qui diffèrent quelquefois par leur intensité, mais qui ne manquent jamais.

Il a dessiné les spectres donnés par différents métaux, et parmi les résultats qu'il a obtenus on peut citer les suivants : le cadmium employé comme conducteur donne des raies bleues et vertes très-belles; le spectre est un des plus beaux que l'on puisse obtenir.

L'antimoine produit beaucoup plus de raies brillantes que les autres métaux et sans couleur dominante ; l'étincelle est très-blanche. Le bismuth présente le même caractère.

Le plomb donne à l'étincelle une lumière dont le spectre est remarquable par son étendue violette et par les belles raies que présente cette couleur. Le zinc est caractérisé par le vert-pomme très-étendu de son spectre.

Le charbon est remarquable par la multitude de raies brillantes qu'il présente. Le fer et l'étain n'offrent rien de particulier.

Le spectre produit entre des conducteurs en argent est caractérisé par une teinte verte, très-intense, et par plusieurs lignes de cette couleur. Le spectre obtenu avec des étincelles éclatant entre des conducteurs d'or contient plus de jaune que celui qui est produit par l'argent et des lignes violettes remarquables. Quant au platine, il n'offre rien de particulier.

Actuellement, pour faire ces mêmes expériences, au lieu d'un appareil semblable à celui de la figure 26, on se sert d'un spectroscope ordinaire, comme celui qui a été décrit dans le livre précédent, page 150. Si l'on fait éclater alors les étincelles entre des électrodes métalliques, par exemple de sodium, de thallium, etc., on observe les raies caractéristiques de ces métaux et identiques à celles que donnent les flammes, et qui ont été représentées planche fig. 18; en même temps, on peut voir apparaître d'autres raies que celle des flammes, en raison de l'incandescence excessive qui se produit avec l'électricité, et comme on l'a expliqué dans le livre IV.

On peut oberver les étincelles produites au milieu des liquides ; plusieurs d'entre eux, comme l'essence de térébenthine, sont assez isolants pour permettre une décharge immédiate dans la masse. Pour d'autres, tels que l'eau, qui laissent facilement circuler l'électricité de tension, on fait précéder l'étincelle d'une étincelle dans l'air.

Masson, qui avait soumis ces étincelles au même moded'expérimentation que les autres, n'avait observé aucune raie brillante dans leurs spectres. M. Daniel (1) s'est assuré depuis que si l'étincelle n'est pas très-forte, on peut voir au milieu des liquides les raies caractéristiques des électrodes, en même temps que les raies qui proviennent de l'incandescence des éléments dont ils sont formés, de sorte que l'étincelle a lieu comme si elle éclatait dans la vapeur même de ces liquides. M. Du Moncel et M. Seguin ont également observé l'image spectrale de l'étincelle d'induction dans diverses circonstances (2).

On a vu plus haut que M. Wheatstone avait remarqué que le spectre de l'étincelle tirée du mercure consistait en 7 raies ou bandes brillantes ; M. Gladstone (3) en analysant la lumière de la lampe photo-électrique construite par M. Way, et qui consiste en une veine de mercure portée à l'incandescence et volatilisée au moyen d'un fort courant électrique, a reconnu que cette lumière présentait 23 raies depuis le rouge jusque bien au delà du violet, parmi lesquelles il y en avait 5 de plus réfrangibles que les raies H du spectre solaire. La particularité la plus remarquable de ce spectre est le grand éclat de la 23$^{e}$ raie, située bien au delà de H, dans une région où le spectre solaire ne contient plus de lumière qui soit visible sans des précautions particulières consistant dans l'élimination des rayons voisins de plus forte intensité. Les rayons de cette réfrangibilité sont donc incomparablement plus intenses avec la lumière électrique du mercure qu'avec la lumière solaire. Quand elle est concentrée sur l'œil l'impression en est d'un rouge violet, et quand elle a un éclat moindre, d'un gris rougeâtre.

M. Angström (4), qui s'est également occupé de la composition de la lumière des étincelles électriques, a fait voir que les raies brillantes qui ne dépendent pas de la nature des électrodes proviennent de la nature

(1) *Comptes rendues de l'Acad. des Sciences*, t. 57, p. 98.

(2) Du Moncel, *Notice sur l'app. d'induction*, 5$^{e}$ édit. ; 1867.

(3) *Philosoph. magazine*, 4$^{e}$ série, t. 20, p. 249. — *Ann de chim et de physique*, 3$^{e}$ série, t. 61, p. 158.

(4) *Ann. de Poggendorf.*, t. 94, p. 144.

du gaz au milieu duquel la lumière électrique se produit. M. Van der Willigen (1) a étudié particulièrement cette influence des gaz, en disposant les deux électrodes dans l'intérieur d'un récipient où l'on pouvait faire le vide ou introduire des gaz à volonté. Il a trouvé, comme M. Angström, des raies caractéristiques de chaque gaz.

M. Plucker (2) a soumis à l'analyse des gaz raréfiés contenus dans des tubes qui ont été préparés d'abord par M. Geissler, et qui présentent quand ils sont traversés par des décharges d'induction des apparences lumineuses diverses, suivant la nature des gaz. Dans ce cas en effet l'incandescence excessive des gaz raréfiés donne lieu à des effets lumineux semblables à ceux qui seraient produits par des flammes formées avec ces gaz.

Fig. 27.

La disposition la plus simple consiste à avoir un tube capillaire *a b*, fig. 27, soudé à deux tubes d'un plus large diamètre A, B; ces deux tubes portent les électrodes qui pénètrent dans leur intérieur et y sont soudées. On voit que le gaz raréfié, qui est renfermé à l'intérieur, donne une ligne lumineuse très-brillante dans la partie capillaire *ab* de l'appareil et c'est cette ligne qu'on peut analyser avec un spectroscope ordinaire. Dans les parties A et B, on observe des stratifications plus ou moins fortes suivant la nature et la densité des gaz, mais dont il n'est pas nécessaire de nous occuper ici.

On trouve, au moyen de cette disposition, des systèmes de raies caractéristiques pour chaque gaz, comme on observe dans les flammes des raies brillantes caractéristiques des matières qui sont à l'incandescence dans ces flammes. Ainsi l'hydrogène donne trois raies, de teintes orangée, bleue et violette, et ayant les mêmes positions que celles des trois raies noires, C, F, G, du spectre solaire. Quand on opère avec des gaz composés, ces gaz peuvent être décomposés par le passage des premières décharges et alors on a les spectres des éléments sépa-

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 106, p. 610, et t. 107, p. 473, 1859. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 57, p. 367.

(2) *Ann. de Pogg.*, t. 107, p. 497 et 638, 1859. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t 57, p. 497.

rés, à moins que l'un d'eux ne disparaisse. C'est ce qui arrive pour la vapeur d'eau et pour certains gaz humides : la vapeur d'eau est décomposée, l'oxygène s'unit à l'électrode positive, et il reste de l'hydrogène facile à reconnaître par ses trois raies.

Chaque gaz offre des effets différents suivant sa nature, et M. Plucker a de plus montré que suivant l'intensité des décharges l'aspect de l'image spectrale pouvait changer, comme dans les flammes à des températures plus ou moins hautes les raies peuvent se trouver en nombre différent.

Conjointement avec M. Hittorf (1), il a analysé ces derniers effets, et il a reconnu, par exemple, qu'avec des tubes contenant de l'azote raréfié on pouvait avoir un spectre présentant trois apparences différentes suivant le mode d'exciter les décharges qui se propageaient au travers du gaz. La cause de ces changements ne paraît pas être parfaitement connue.

On a vu, dans le livre précédent, que les décharges électriques sont employées pour reconnaître la position des raies données par la matière des électrodes volatilisée au moyen des décharges, et dans ce cas l'incandescence a lieu à la température la plus élevée que l'on puisse produire.

### § 2. *Arc voltaïque.*

Masson a obtenu des effets du même genre en réfractant la lumière de l'arc voltaïque formé dans l'air, comme en analysant celle des étincelles. Il a comparé les raies obtenues entre les mêmes pôles métalliques en faisant usage des étincelles, puis des arcs, et il a trouvé dans les spectres des arcs voltaïques des raies qui ont leurs analogues dans ceux des étincelles ; mais beaucoup d'entre elles manquent. Il a attribué le moins grand nombre de raies brillantes du spectre de l'arc voltaïque à ce qu'il est produit par un faible excès de tension électrique, et qu'il se comporte comme étant formé par une succession d'étincelles moins vives que les étincelles ordinaires.

L'emploi des spectroscopes, c'est-à-dire le mode d'observation directe de l'image spectrale, est celui qui convient le mieux pour l'étude de la composition de la lumière électrique ; cependant, on peut également se servir de la projection des images lumineuses réfractées de l'arc vol-

(1) *Philosophical transactions*, t. 155, 1865. — *Annales de chimie et de physique*, 4e série, t. 3, p. 505.

taïque formé entre des électrodes de différents métaux, principalement lorsqu'on veut montrer dans un cours les principales lignes lumineuses caractéristiques de ces métaux. Pour opérer de cette manière, on produit l'arc voltaïque au moyen d'un régulateur de lumière électrique, et à l'aide d'une disposition convenable on fait réfracter au travers d'un prisme très-dispersif, en sulfure de carbone ou en flint très-réfringent, un faisceau de rayons émanés de l'arc et qui vient donner sur un écran placé à distance une image du spectre lumineux.

La fig. 27 *bis* représente la disposition qui peut être employée lorsqu'on

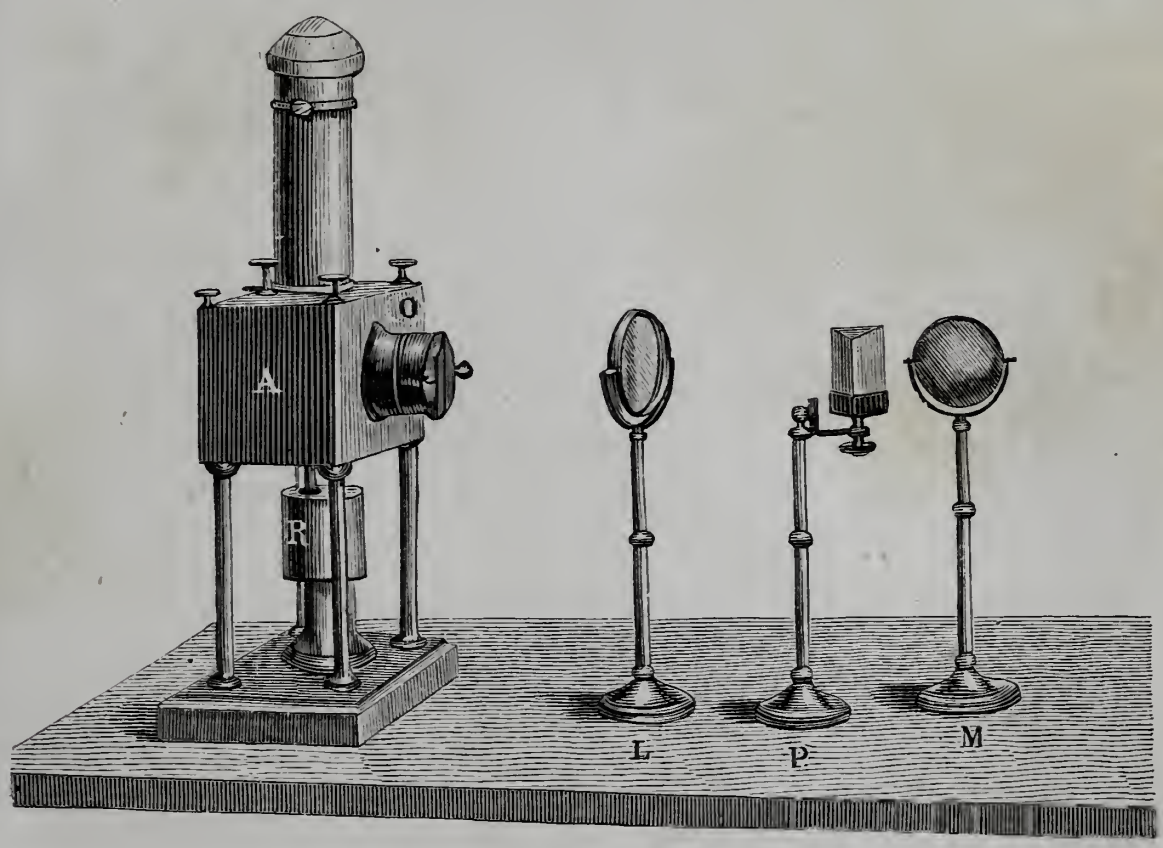



Fig. 27 *bis*.

se sert du régulateur photo-électrique construit par M. J. Duboscq. A est une lanterne métallique qui entoure l'arc voltaïque formé au moyen du régulateur R et empêche la diffusion de la lumière dans la salle d'expériences. A la partie antérieure O se trouve une lentille dont le foyer correspond à la position de l'arc formé au milieu de A, de sorte qu'une portion des rayons lumineux émanés de cet arc est transmise horizontalement dans l'axe du tube O, et en traversant une fente rectiligne verticale, dont on peut faire varier la largeur, vient en dehors de la lanterne.

Le faisceau de rayons lumineux parallèles qui traverse l'ouverture longitudinale vient tomber sur une lentille achromatique L, dont la longueur focale est de 30 à 40 centimètres. Cette lentille a pour but de faire converger les rayons lumineux sur le tableau blanc qui doit recevoir l'image du spectre, de sorte que l'ouverture rectiligne et le tableau occupent deux positions de foyers conjugués par rapport à la lentille.

En P est placé un large prisme, à arêtes verticales, qui réfracte le faisceau lumineux; on fixe ce prisme dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens, et quand on veut recevoir l'image du spectre sur un tableau disposé perpendiculairement à l'incidence des rayons, au moyen d'un miroir plan M, situé très-près de P, on dirige les rayons réfractés dans la direction convenable pour que le spectre se trouve au milieu du tableau.

Si les conducteurs en charbon du régulateur R sont aussi purs que possible, l'image par projection du spectre est continue et sans apparence de raies brillantes. On s'en rend aisément compte en remarquant que la plus grande partie de la lumière de l'arc voltaïque étant due à l'irradiation des extrémités des conducteurs en charbon, le globe de feu qui les entoure, ou la flamme due à l'incandescence des particules gazeuses qui transmettent l'électricité, a une intensité moindre. Dès lors l'image du spectre étant produite en grande partie par l'incandescence d'un corps solide et les lignes lumineuses qui sont dues à l'incandescence des gaz carbonés n'ayant qu'une intensité faible, celles-ci ne sont pas apparentes, et le spectre ne doit pas sensiblement présenter de raies. Du reste, pour faire cette projection du spectre et avoir une image continue et bien lumineuse, on a soin de rapprocher l'un de l'autre les charbons polaires du régulateur, afin que l'arc soit plus court et que les rayons qui forment le spectre émanent des pointes de charbon incandescentes.

Si l'on forme l'arc voltaïque avec des conducteurs métalliques, alors les conditions changent, car les vapeurs métalliques incandescentes donnent des lignes lumineuses d'une grande vivacité. On a toujours deux spectres lumineux superposés, l'un, continu, dû à l'incandescence des extrémités des conducteurs, l'autre dû aux vapeurs; au lieu de rapprocher les conducteurs pour faire dominer le premier, on les éloigne, on ne reçoit que la lumière du milieu de l'arc, et alors le spectre des vapeurs incandescentes est seul appréciable.

On peut sans employer des électrodes métalliques avoir cependant

les images des spectres de vapeurs métalliques en opérant de la manière suivante : on dispose l'extrémité du charbon positif inférieur du régulateur R en forme de petite coupelle dans laquelle on place un fragment des métaux, tels que l'argent, le zinc, le cuivre, le thallium, le sodium, etc., que l'on veut volatiliser; puis on établit le contact de la pointe négative du charbon supérieur avec le fragment de métal, et aussitôt le courant électrique qui circule dans le régulateur échauffe et volatilise la matière, et l'arc se trouve formé par l'intermédiaire des vapeurs métalliques incandescentes.

Si l'on opère avec un fragment d'argent placé dans la petite coupelle, l'image prismatique se trouve en partie composée par deux lignes vertes très-brillantes, l'une comprise entre D et E, mais plus près de E, et la seconde correspondant à peu près à E.

Le cuivre donne trois raies vertes caractéristiques à peu près équidistantes ; la moins réfrangible correspond à la plus réfrangible de l'argent, la deuxième et la troisième sont comprises entre *b* et F.

Le zinc a pour caractère une ligne rouge placée à l'extrémité la moins réfrangible du spectre, et un système de trois raies bleues d'une très-belle couleur, comprises entre F et G, les deux dernières étant voisines l'une de l'autre. Si au lieu de se servir de cuivre rouge on emploie le laiton, on a simultanément le système des trois raies correspondant au cuivre et celui des quatre raies qui correspondent au zinc.

Le thallium donne la raie verte caractéristique de ce métal (*voir* planche fig. 18). Le sodium dans les premiers instants donne lieu à la production d'une raie noire à la place correspondante à D, puis peu après à l'apparition de la ligne jaune qui remplace cette ligne d'absorption ; il se produit le même effet que celui qui a été décrit dans le IV^e livre, page 163. Les autres métaux donnent aussi des raies comme on l'a indiqué dans le livre IV, page 154 et suivantes.

Dans ces différents cas la largeur des raies dépend de la largeur de l'image de l'ouverture projetée sur le tableau; si on diminue cette largeur d'ouverture, les raies sont plus déliées; en l'augmentant, la quantité de lumière reçue sur le tableau augmente, et les raies gagnent en grosseur, absolument comme lors de l'observation directe. Quant au nombre des raies, ainsi qu'on l'a déjà dit au commencement de ce paragraphe, il est moins grand qu'en opérant avec les étincelles.

Les résultats qui viennent d'être exposés et la présence des raies lumineuses des spectres des étincelles aux mêmes places que les raies

brillantes des flammes qui renferment comme élément des particules provenant des électrodes entre lesquelles éclatent les étincelles, montrent donc que la lumière électrique est bien due à l'incandescence de la matière : cette incandescence provient en grande partie des particules volatilisées des conducteurs dans le cas des étincelles et des décharges, et de celle des milieux gazeux qui entourent les électrodes quand l'électricité traverse les gaz raréfiés. Ainsi, la composition de la lumière électrique conduit à la même conclusion que celle à laquelle on était arrivé par l'étude des autres propriétés de l'électricité.

# CHAPITRE IV.

## Persistance lumineuse des gaz après le passage des décharges électriques.

On verra dans le livre suivant qu'en 1857 (1) j'ai fait usage de tubes contenant de l'air raréfié pour rendre phosphorescentes des matières placées à l'intérieur au moyen des décharges qui les traversent. Quelque temps après (2), M. Ruhmkorff, qui disposa ces appareils suivant mes indications, me fit remarquer que dans certains tubes ne contenant que des gaz raréfiés, et que lui avait envoyés M. Geissler, on voyait après le passage des décharges des traces lumineuses persistant seulement pendant plusieurs secondes et analogues à celles que répandent les matières phosphorescentes dont on parlera plus loin.

On représente ci-contre, fig. 28, un de ces tubes formé par des sphères jointes entre elles au moyen de parties d'un plus petit diamètre, et dans les deux sphères extrêmes duquel pénètrent les deux conducteurs qui peuvent être réunis aux tiges polaires d'un appareil d'induction. Au moment où la décharge commence à passer, la partie intérieure des sphères présente dans l'obscurité une lueur blanchâtre opaline ; dans les tubes de jonction elle se manifeste également, mais elle est diminuée par la lumière plus

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 55, p. 92.
(2) *Ibid.*, t. 57, p. 108.

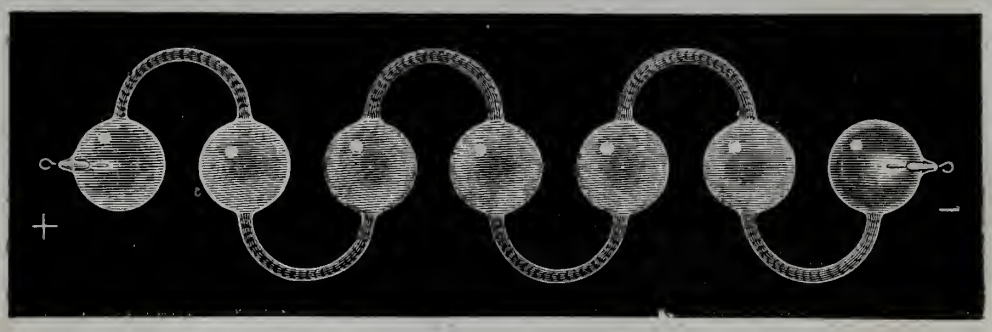



Fig. 28.

intense de la décharge électrique. Une fois la communication avec l'appareil interrompue, cette lumière subsiste dans l'obscurité pendant plusieurs secondes, en décroissant graduellement d'intensité. Il y a une différence notable dans les deux sphères extrêmes ; la sphère en communication avec le pole négatif, qui donne une lumière bleue pendant le passage de l'électricité, n'offre pas de persistance bien appréciable, tandis que la sphère positive, lumineuse rouge pendant la décharge, présente ces effets comme les sphères intermédiaires. En intervertissant le courant dans l'appareil d'induction, on voit le phénomène se produire de même dans le tube, mais en sens opposé; l'effet produit du côté négatif a peu de persistance.

J'ai étudié le passage des décharges électriques au travers des gaz et des vapeurs raréfiés, passage qui donne lieu à des effets lumineux dépendant de leur nature, afin d'examiner quels sont les gaz qui présentent l'effet de persistance lumineuse. Dans la plupart des tubes contenant des gaz tels que l'hydrogène sulfuré, le protoxyde d'azote, le chlore, on trouve de faibles lueurs persistant après le passage de l'électricité d'induction, ou même d'une simple décharge d'une batterie électrique, mais l'action semble bornée à la surface intérieure du tube de verre. Elle ne paraît pas due à la phosphorescence du verre, car ces tubes exposés à l'action d'une vive lumière, puis rentrés dans l'obscurité, ne donnent lieu à aucune action de ce genre, et il faut, comme on le verra, employer le phosphoroscope pour observer des effets de persistance sur le verre, effets dont la durée est plus courte que celle qui suit l'action de l'électricité. L'effet présenté par des tubes contenant quelques gaz autres que ceux dont il va être question semble donc résulter d'une électrisation du verre ou de la couche gazeuze adhérente.

Avec l'oxygène j'ai observé un effet différent : après l'avoir préparé

au moyen du chlorate de potasse fondu, puis desséché et privé de chlore par son passage dans des tubes à potasse et à chlorure de calcium, en faisant passer au travers d'un tube contenant ce gaz raréfié les décharges d'un appareil d'induction fortement excité, et en interrompant tout à coup le passage de l'électricité, le tube paraît éclairé d'une teinte jaune, qui persiste pendant plusieurs secondes après l'interruption et va en décroissant plus ou moins rapidement suivant des conditions que je n'ai pu préciser jusqu'ici. Pour que l'effet soit bien manifeste, il faut que l'électricité transmise dans le gaz ait une certaine tension; aussi est-il préférable d'interposer un condensateur dans le circuit et d'exciter des étincelles à distance, dans l'air, entre un des conducteurs de l'appareil d'induction et l'un des fils de platine pénétrant dans le tube. Une simple décharge d'une batterie de plusieurs bocaux produit le même effet. Pour observer l'action lumineuse persistante il faut avoir soin de tenir les yeux fermés pendant les décharges et de ne les ouvrir qu'immédiatement après, afin que la rétine ne soit pas impressionnée à l'instant du passage de l'électricité. Il est nécessaire également que la partie du tube où la décharge se produit ait au moins 15 à 20 centimètres de longueur.

L'action particulière qui illumine le tube a lieu entre les molécules mêmes du gaz et non contre les parois du tube, car en se servant de sphères d'une capacité de 2 à 3 centimètres cubes, la masse entière du gaz devient opaline. En donnant plus de longueur aux tubes au-delà des fils de platine, on observe également que le gaz raréfié en dehors de la partie qui reçoit immédiatement la décharge donne lieu à une émission de lumière. D'un autre côté, cette opalescence du gaz indique que l'effet ne résulte pas de décharges électriques dues à l'électrisation du verre, et qui traverseraient l'espace éclairé après la cessation de la décharge électrique, comme on le produit en frottant le tube à l'extérieur. Quand un tube doit donner lieu à un effet de persistance lumineuse, il se produit au moment du passage de l'électricité une teinte jaune qui éclaire la masse de gaz dans le tube, et cela malgré les teintes diverses des rayons électriques, dont la couleur dépend de la nature des gaz mélangés; lorsque cette teinte jaune disparaît, tout effet de persistance cesse. J'ai fait remarquer qu'il était même possible que des gaz mélangés à l'oxygène augmentassent la durée de la persistance, car des tubes préparés dans des conditions semblables en apparence ont donné des effets variables d'intensité et de durée.

Si l'on opère avec un tube renfermant de l'oxygène raréfié et de petite dimension, après un certain temps du passage de l'électricité, l'effet de persistance cesse d'être appréciable ; ce résultat semble montrer que la propriété particulière du gaz dont il est question peut disparaître au bout de quelque temps.

L'acide sulfureux a quelquefois présenté une action analogue ; mais ce gaz ne s'étant pas montré constamment actif, j'ai pensé que l'émission lumineuse provenait peut-être de sa décomposition partielle. Il en est de même pour l'air raréfié en présence du phosphore. En général, j'ai observé que dans les gaz la présence de l'oxygène paraissait nécessaire pour produire le phénomène.

Depuis cette époque, M. Morren (1) a annoncé que l'oxygène seul ne devenait pas lumineux après le passage des étincelles, mais qu'il était nécessaire de le mélanger avec d'autres gaz, notamment avec de l'azote ; que si au mélange on ajoutait un peu de vapeur d'acide azotique monohydraté elle est plus prononcée, et qu'elle est encore plus forte en ajoutant une goutte d'acide sulfurique anhydre. Il pense donc que les gaz secs et purs n'offrent aucune persistance lumineuse après le passage des décharges ; il attribue ce phénomène à une réaction chimique et à la présence temporaire de produits qui sont ensuite détruits pour se reformer lors d'un nouveau passage des décharges. Cependant on doit remarquer qu'il a conclu que l'oxygène était nécessaire pour la production du phénomène, comme je l'avais annoncé en 1859.

J'ai fait de nouveau une série d'expériences se rapportant à ce sujet (2), et je me suis assuré que si des mélanges de gaz avec l'oxygène donnent des effets lumineux persistants plus marqués, néanmoins en employant de l'oxygène préparé avec du chlorate de potasse fondu, et convenablement desséché au moyen d'un tube rempli de potasse, ce gaz isolé devient lumineux après l'action des décharges électriques. Avec un petit ballon de 15 à 20 centimètres cubes successivement rempli d'air raréfié et de cet oxygène également raréfié, et qui était dans un gazomètre à mercure, l'air n'a présenté qu'une persistance à peine appréciable, tandis que celle de l'oxygène était bien manifeste, quoique de courte durée. J'ai pu reproduire cet effet dans le même ballon, à cinq ou six reprises différentes. On ne peut assurer que le gaz

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 4, p. 293, 1865.
(2) *Leçons faites à la Société chimique de Paris*, 1861, p. 187.

que j'ai employé ait été complétement pur, malgré les précautions prises pour qu'il en soit ainsi, et même s'il eût été pur, de l'azote ou d'autres produits existant dans l'atmosphère, et adhérant au verre, auraient pu se mélanger avec lui dans le tube ou dans les ballons ; on ne peut donc pas affirmer quelle est la cause du phénomène. On doit seulement admettre comme résultant des expériences : 1° que l'oxygène est nécessaire à la production de ce phénomène, et qu'on ne l'observe pas d'une manière très-marquée sans lui ; 2° que les mélanges d'autres gaz peuvent augmenter l'effet de persistance.

Le phénomène de persistance dans l'action lumineuse ou de phosphorescence des gaz offre autant d'intérêt, soit qu'il tienne à un mouvement vibratoire des particules dû à l'action préalable de la décharge ou à l'incandescence qui en résulte, soit qu'il provienne des réactions chimiques exercées entre l'oxygène et des gaz ou des vapeurs. On sait en effet qu'un grand nombre de réactions chimiques ont lieu à basse température, mais aucune, sauf la combustion lente du phosphore et peut-être, dans certaines circonstances, la combustion du soufre ainsi que l'action lente de l'oxygène sur le bois ou les matières végétales, ne donne de lumière. On sait également qu'un grand nombre de cristaux peuvent se former au sein des dissolutions, mais ce n'est que dans des circonstances particulières, comme on l'a vu page 39, que l'acide arsénieux vitreux et des sulfates doubles produisent une émission de lumière; dans ces différents cas l'apparition des rayons lumineux n'est pas une conséquence nécessaire de l'action chimique ou de l'effet moléculaire, puisque des actions du même genre peuvent avoir lieu sans conduire au même résultat; elle pourrait provenir de changements dans la constitution des corps, et qui n'ont pu encore être appréciés. Ainsi cette persistance lumineuse temporaire, c'est-à-dire cette phosphorescence qui est produite par l'oxygène ou par son mélange ou sa combinaison avec d'autres corps, est aussi curieuse que l'effet lumineux donné par la combustion lente du phosphore (1).

(1) Je prends occasion de faire remarquer que lorsqu'on se sert d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, si l'on examine la flamme seule, on voit, si l'oxygène domine, comme une traînée de teinte jaunâtre qui se prolonge à l'extrémité du dard et au-delà. Cette teinte est analogue à celle que l'on observe dans les tubes à gaz raréfiés dont il vient d'être question.

# CHAPITRE V.

## Météores lumineux d'origine électrique.

---

### 1. *Lueurs électriques de l'atmosphère; éclairs.*

La réunion des électricités entre les nuages orageux et la terre ne s'effectue pas toujours par des décharges donnant lieu aux effets de la foudre ; souvent cette réunion s'opère lentement, par l'intermédiaire des corps placés à la surface du sol, et se manifeste par des aigrettes et des lueurs plus ou moins vives, principalement aux extrémités des corps terminés en pointe. Quelquefois ces lueurs apparaissent sur la tête des individus, à l'extrémité des objets qu'ils portent à la main, sur les pointes des lances et des fusils des soldats, etc.

Ces feux électriques sont plus fréquents en mer, à l'extrémité des mâts et des vergues que sur terre, parce que l'électricité n'a pas d'autres conducteurs pour se rendre dans l'eau. Ils y étaient connus depuis un temps immémorial sous les noms de Castor et Pollux, de feux Saint-Elme; dans de très-fortes tempêtes, on en a vu quelquefois sous la forme de langues de feu qui faisaient entendre de petites détonations.

On a des exemples de pluies étincelantes, de neige et de grêle lumineuses; ces effets sont dus à ce que les particules aqueuses viennent de régions fortement électrisées. On a cité des exemples de nuages lumineux, mais il s'agit de savoir alors si plusieurs phénomènes météoriques n'ont pas existé simultanément, et si ces effets n'ont pas été compliqués peut-être de ceux de l'aurore boréale. On a cité également des brouillards que l'on prétend avoir été lumineux, notamment celui de 1783.

Les éclairs qui sillonnent l'espace compris entre deux nuées, ou bien entre un nuage et le sol ou des objets qui sont à sa surface, sont le résultat de décharges électriques des nuages orageux. Leur durée n'atteint pas un millionième de seconde (1). Le son parcourant dans

(1) Arago, *Notice sur le tonnerre.* — *Annuaire du bureau des longitudes*, 1838, p. 267.

l'air environ 337 mètres par seconde, il doit s'écouler entre l'apparition de l'éclair et la détonation autant de secondes qu'il y a de fois 337 mètres entre le lieu où l'on est et celui où éclate la foudre. Delisle a compté une fois 72 secondes entre l'éclair et le bruit du tonnerre : c'est l'intervalle le plus long dont fassent mention les recueils météorologiques; ce nombre donne pour la distance moyenne de l'observateur au nuage où l'éclair s'est montré 24264 mètres, ou six lieues de 4 kilomètres.

Quand l'éclair brille sans être suivi d'un coup de tonnerre, on est assuré que le lieu où s'opère la décharge est situé à une distance telle de l'observateur que le son est inappréciable. Les éclairs dits de chaleur, parce qu'ils brillent dans les belles nuits d'été, ne sont probablement que la réverbération sur des couches atmosphériques élevées d'éclairs ordinaires produits dans des nuages orageux que l'on ne peut apercevoir à cause de la forme arrondie de la terre. Ces éclairs silencieux, étant engendrés au milieu de nuages situés à de grandes distances de l'observateur, le bruit des détonations et du roulement du tonnerre ne peut parvenir jusqu'à lui.

L'éclair suit toujours une ligne courbe ou brisée, la réunion des électricités s'opérant de préférence par le chemin de moindre résistance à la transmission de cet agent. L'étincelle ou la réunion des étincelles a une longueur variable, et peut atteindre même plusieurs lieues; cet effet provient non-seulement de l'action par influence, mais encore de la présence des nuage isolés ou même de globules de vapeur servant d'intermédiaires pour opérer la décharge. Il se produit dans cette circonstance l'effet que l'on remarque dans la bouteille de Leyde étincelante ou avec le tableau étincelant.

Ordinairement les éclairs sont blancs ; quelques météorologistes prétendent en avoir observé de teintes semblables à celles que présente la lumière électrique dans un air plus ou moins raréfié.

On distingue trois classes d'éclairs : les éclairs de la première classe ont la forme d'un sillon de lumière, mince, serré, très-arrêté sur les bords, se mouvant en zig-zag et pouvant se bifurquer ou se diviser en plusieurs branches. Ces éclairs peuvent être comparés aux étincelles que l'on tire d'une machine électrique ordinaire.

Les éclairs de la deuxième classe comprennent ceux dont la lumière, au lieu d'être concentrée en un trait lumineux, occupe un espace considérable. La décharge électrique dans cette circonstance paraît avoir

lieu à l'intérieur des nuages et en éclairer la masse. Ces éclairs, qui sont les plus communs, peuvent être comparés à l'étincelle brillante, large et peu longue, qui résulte de la décharge d'une batterie dans laquelle l'électricité est condensée. La teinte de ces éclairs est souvent d'un rouge très-intense, mêlé quelquefois de blanc ou de violet.

Les éclairs de la troisième classe diffèrent des précédents sous le rapport de la vitesse et de la durée. Ils sont visibles pendant une, deux et même dix secondes, de sorte qu'ils peuvent se transporter des nuages sur la terre pendant un temps assez appréciable pour que l'on puisse suivre de l'œil leur mouvement. Leur forme est à peu près sphérique; de là la dénomination d'éclairs en boule qui leur a été donnée; ce sont de véritables globes de feu, qui se divisent parfois et rebondissent même sur la terre à plusieurs reprises. Ils ont des mouvements tantôt lents, tantôt rapides, et quelquefois en éclatant ils font entendre un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. Il est à remarquer que la foudre se présente en général sous cette apparence quand elle pénètre dans l'intérieur des édifices.

Jusqu'ici on n'a pu donner une explication satisfaisante de la formation et de la nature de cette sorte d'éclairs. On a bien émis l'hypothèse qu'ils sont produits par un écoulement continu d'électricité, dû à l'accumulation des nuages supérieurs et ayant lieu là où l'on observe le phénomène. La marche du globe ne serait alors que le résultat du déplacement du point par lequel la réunion des électricités a lieu; mais cette hypothèse n'explique pas toutes les circonstances du phénomène, et dans l'état actuel de la science on doit dire que l'on ignore quelle est l'origine de ces globes de feu.

### § 2. *Aurore polaire.*

L'aurore polaire est cette lueur formée par des rayons diversement colorés qui jaillissent de toutes les parties de l'horizon à certaines époques, dans l'hémisphère nord ou dans l'hémisphère sud; quand on l'observe dans nos climats elle porte le nom d'aurore boréale. L'apparition de ce phénomène est annoncée par des perturbations exercées sur l'aiguille aimantée, qui établissent une liaison intime entre ce phénomène et la distribution du magnétisme sur le globe et nous indiquent qu'il a très-probablement une origine électrique.

L'aurore boréale dans nos contrées a en général l'apparence d'un

brouillard assez obscur vers le nord, avec un peu plus de clarté vers l'ouest que dans le reste du ciel. Ce brouillard prend peu à peu la forme d'un segment de cercle s'appuyant de chaque côté sur l'horizon. La partie visible de la circonférence est bientôt entourée d'une lumière blanche donnant naissance à un ou plusieurs arcs lumineux; viennent ensuite des jets et des rayons de lumière diversement colorés partant du segment obscur.

Quand l'aurore s'est étendue, il se forme une couronne au zénith, où concourent les rayons lumineux. Le phénomène alors diminue d'intensité; on observe cependant encore de temps à autre des jets de lumière, une couronne ayant des couleurs plus ou moins vives, tantôt d'un côté du ciel, tantôt d'un autre; enfin le mouvement cesse, la lueur se rapproche de plus en plus de l'horizon et s'arrête vers le nord. Le segment obscur en se dissipant devient lumineux; sa clarté est d'abord assez prononcée près de l'horizon, plus faible au-dessus et finit par se perdre dans le ciel.

Souvent sous nos latitudes l'aurore boréale ne se manifeste que par des teintes rougeâtres répandues dans le ciel vers le nord; mais elle peut affecter d'autres formes, quoique plus rarement; ainsi Mairan a observé le 19 octobre 1726, à Breuille-Pont, une aurore composée d'un seul segment obscur percé symétriquement, autour de son bord, de créneaux à travers lesquels on croyait voir un incendie (1).

Dans le Nord ce phénomène est plus fréquent, et se présente sous un autre aspect et avec plus d'éclat. Les observations faites à Bossekop (West-Finmark), dans la baie d'Alten (70° de latit. nord), pendant l'hiver de 1838 à 1839, par la commission scientifique française, mettent bien ce fait en évidence (2).

Du 7 septembre 1838 au mois d'août 1839, dans l'intervalle de 206 jours, on a compté 143 aurores boréales, qui ont été surtout très-fréquentes du 17 octobre au 25 janvier, pendant l'absence du soleil, de sorte que dans cette nuit de 70 fois 24 heures on a observé 64 aurores, sans compter celles dérobées à la vue par un ciel entièrement couvert, et dont néanmoins la présence était accusée par la perturbation des mouvements de l'aiguille aimantée (3).

(1) Mairan, *De l'aurore boréale*; Paris, 1754.

(2) *Voyage au Spitzberg, Partie physique.* — Becquerel et E. Becquerel, *Traité d'électricité*, t. 1er, page 441.

(3) La planche annexée à cet ouvrage représente deux aurores boréales : la première, fig.

AURORE BORÉALE OBSERVÉE A BOSSECOP, le 9 Janvier 1834.

Dessiné par M. Bévalet.

Gravé par Paul Legrand.

En général dans ces régions le soir, entre quatre et huit heures, la brume légère qui règne presque habituellement au nord de Bossekop, à la hauteur de 4° ou 6°, se colore à sa partie supérieure ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore qui existe derrière. Cette bordure forme un arc vague, d'une couleur jaune pâle, dont les bords sont au-dessus et dont les extrémités s'appuient sur la terre. Cet arc monte plus ou moins lentement, son sommet étant dans le méridien magnétique ou à peu près.

Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement la matière lumineuse de l'arc, les rayons sont formés; ils s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément; ils augmentent et diminuent subitement d'éclat. La partie inférieure, la base des rayons, offre toujours la lumière la plus vive et forme un arc plus ou moins régulier. La longueur des rayons est souvent très-variée, mais ils convergent tous vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de la pointe sud de l'aiguille aimantée ; parfois ils se prolongent jusqu'à leur point de réunion, formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse.

L'arc continue à monter vers le zénith; il éprouve un mouvement ondulatoire dans sa lueur. Il offre un mouvement alternatif dans le sens horizontal, figurant les ondulations ou les plis d'un ruban ou d'un drapeau agité par le vent. Parfois une de ses extrémités et même toutes deux abandonnent l'horizon; alors les plis deviennent plus nombreux, mieux prononcés, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties formant des courbes qui se referment presque sur elles-mêmes et offrent, n'importe dans quelle parte de la voûte céleste, ce que l'on a nommé la couronne boréale. Alors l'éclat des rayons varie subitement d'intensité et dépasse celui des étoiles de première grandeur; les courbes se forment, se déroulent; les rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert, le reste conserve sa teinte lumineuse jaune clair. L'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'éteint subitement ou s'affaiblit peu à peu. Des fragments d'arc reparaissant, l'arc se reforme lui-même, continue son mouvement ascensionnel et approche du zénith; les rayons, par l'effet de la perspective, deviennent de plus en plus courts, puis le sommet atteint le zénith

21 *bis*, l'aurore vue le 9 janvier 1834 à Bossekop par la commission française ; la deuxième, fig. 22 *bis*, l'aurore boréale observée par Mairan à Breuille-Pont, le 19 octobre 1726, et citée plus haut.

magnétique. Alors les rayons sont vus par leur base; s'ils se colorent dans ce moment, ils montrent une large bande rouge à travers laquelle on distingue les nuances vertes qui leur sont supérieures. Si l'on pense que ces teintes se succèdent et que la voûte céleste à ce moment offre une coupole étincelante, on peut avoir une idée du magnifique spectable qui s'offre à la vue.

La couronne lumineuse ne dure que quelques minutes, puis elle s'affaiblit; l'aurore perd de son intensité. Des effets secondaires se produisent alors, tels que des lueurs vagues, puis ensuite des mouvements irréguliers appelés mouvements de palpitation, qui annoncent la fin de l'aurore. La lueur crépusculaire arrive alors peu à peu, et le phénomène s'affaiblissant graduellement cesse d'être visible.

On a cherché à mesurer la hauteur de l'aurore au-dessus de la terre en déterminant la hauteur angulaire des diverses parties d'un arc, ou de points remarquables aperçus à la fois dans divers pays. Tantôt on a trouvé que le phénomène avait lieu à 200 kilomètres au-dessus du sol, tantôt à 100 kilomètres, et en général à la limite de notre atmosphère.

La commission scientifique du Nord a émis l'opinion que dans les régions polaires les nuits sans aurore sont des nuits exceptionnelles; le phénomène a donc lieu pour ainsi dire d'une manière continue. En moyenne il est cependant soumis à la période diurne, comme la plupart des phénomènes météorologiques ; ainsi, d'après Bravais, qui faisait partie de la commission et qui s'est beaucoup occupé de ce sujet pendant les 206 jours de la période dont il a été question, on a eu en moyenne :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pour la première apparition des arcs..... | 7 heures | 52 | minutes | du | soir. |
| — des rayons..... | 8 | — | 26 | — | — |
| — des plaques..... | 11 | — | 18 | — | — |
| — des lueurs vagues... | 3 | — | 32 | — | du matin. |

Ces nombres ne sont que des moyennes, car dans le Nord le phénomène n'est soumis à aucune apparition rigoureusement régulière.

Si dans les régions polaires les aurores sont fréquentes et ont lieu, pour ainsi dire, tous les jours, dans les latitudes moyennes elles sont plus rares, et ne se montrent que lorsque dans les régions polaires elles ont une certaine étendue. Mairan, qui a rapporté dans son traité *De l'aurore boréale* les exemples d'aurores dont il a pu avoir connaissance jusqu'en 1731, et qui a suivi lui-même les aurores parues en France pendant seize ans (de 1716 à 1731), a remarqué que dans nos

climats elles sont plus fréquentes en hiver qu'en été. En outre, ce phénomène ne s'est pas montré toujours de la même manière : ainsi, en 1724 il y a eu annuellement fort peu d'aurores, deux seulement; en 1728 elles ont été très-fréquentes, mais jamais on n'en avait tant vu qu'au mois d'octobre 1731, où il y a eu en moyenne une aurore sur trois jours. Dans nos latitudes on compte annuellement en moyenne dix aurores boréales.

Bien des théories ont été imaginées pour rendre compte des aurores boréales (1); mais depuis que l'on a trouvé, dans le siècle dernier, que les aurores exercent une action perturbatrice sur l'aiguille aimantée, on les a généralement rapportées à l'électricité. Les arcs et les rayons que l'on voit dans les aurores polaires ont en effet de l'analogie avec ces jets lumineux produits par les décharges électriques dans un gaz raréfié. Ces rayons seraient donc des traînées de matières gazeuses illuminées par des décharges électriques dans les régions élevées de l'atmosphère et capables de prendre toutes espèces de formes et de se diriger sous l'influence des pôles magnétiques de la terre. Ainsi l'électricité atmosphérique dégagée principalement dans les régions équatoriales et venant reconstituer de l'électricité naturelle dans les régions polaires serait la cause de ce brillant phénomène météorique.

M. Delarive (2) a imaginé plusieurs dispositions particulières pour mettre en évidence l'action que le magnétisme exerce sur des rayons électriques produits dans les gaz raréfiés, et a montré comment ces rayons pouvaient recevoir un mouvement de rotation autour du pôle des aimants; ses recherches viennent donc à l'appui de la théorie électrique des aurores polaires.

On représente d'abord ci-après, fig. 28 *bis*, l'appareil d'induction de Ruhmkorff, quinon-seulement sert à faire les expériences dont il est question ici, mais encore dont on a cité fréquemment l'emploi dans le courant de ce livre et dont l'usage sera invoqué pour la production de certains effets de phosphorescence.

Il y en a de plusieurs grandeurs, suivant l'intensité des effets que l'on veut produire : celui qui est représenté ici a les plus grandes dimensions que M. Ruhmkorff donne aux appareils, qui avec le courant d'une pile de 6 à 8 grands éléments présentent dans l'air des étincelles de 35

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*, t. VI, p. 216.

(2) *Comptes rendus*, t. 48, p. 1011; t. 54, p. 1171. — *Ann. de chim. et de phys.*, t. 54, p. 238.

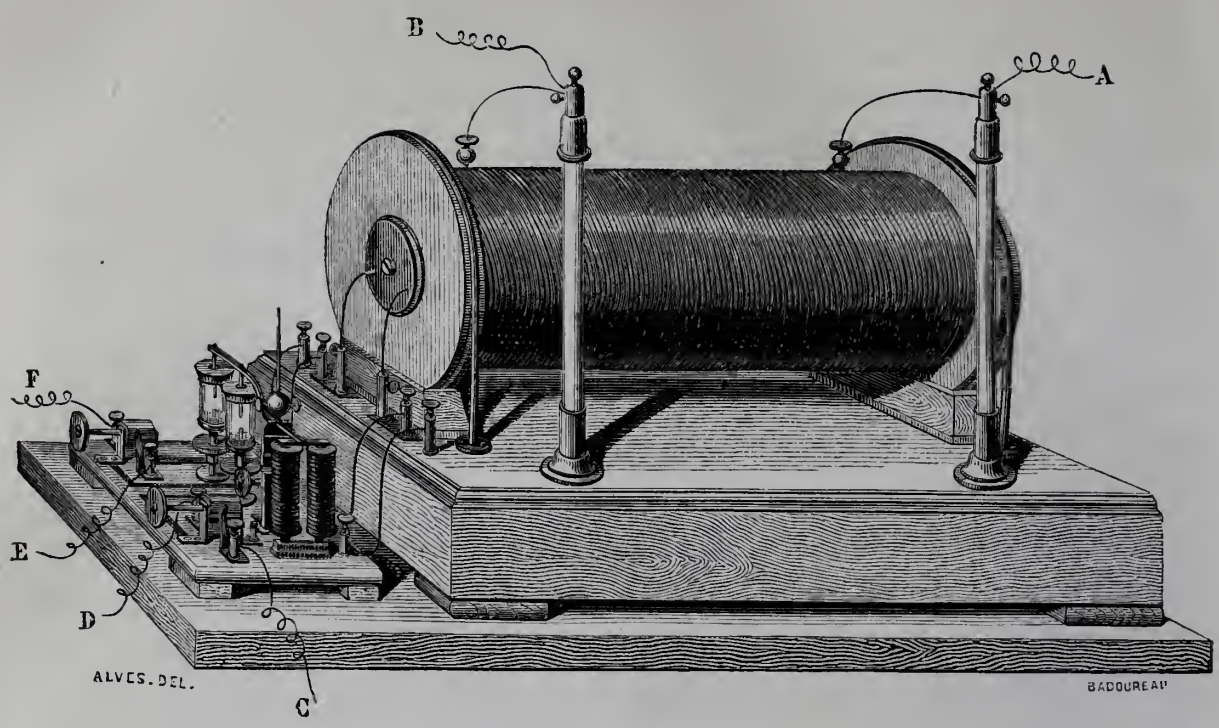



Fig. 28 *bis*.

à 40 centimètres de longueur. L'interrupteur à mercure est mis en mouvement au moyen d'un petit électro-aimant placé sur le côté, et qui reçoit le courant électrique d'une pile additionnelle de 1 ou 2 couples dont les pôles sont fixés aux fils C et D; le courant électrique inducteur passe par les fils E et F, est alternativement interrompu par le mouvement de l'interrupteur, et en traversant le gros fil de la bobine, produit dans le long circuit de fil fin terminé en A et B, les effets d'induction que l'on veut utiliser (1).

Parmi les appareils dont M. Delarive a fait usage, on peut citer le suivant comme très-facile à faire fonctionner et manifestant bien l'action exercée par le magnétisme sur les décharges électriques dans les gaz :

Un électro-aimant G fig. 28 *ter*, placé sur une tablette et se maintenant verticalement, peut être aimanté temporairement dans un sens ou dans un autre par un courant électrique transmis à l'aide d'un commentateur J; une barre en fer doux AB, entourée sur toute sa surface d'une couche isolante très-épaisse, sauf à ses deux extrémités, est fixée sur l'électro-aimant et pénètre dans l'intérieur d'un ballon ovoïde où l'on peut faire le vide; un anneau en cuivre CD, qui entoure la barre de fer doux dans l'intérieur du ballon, est isolé de cette barre, et au

(1) Voir pour la description des différents appareils d'induction la notice publiée par M. Du Moncel, 5e édition 1867.

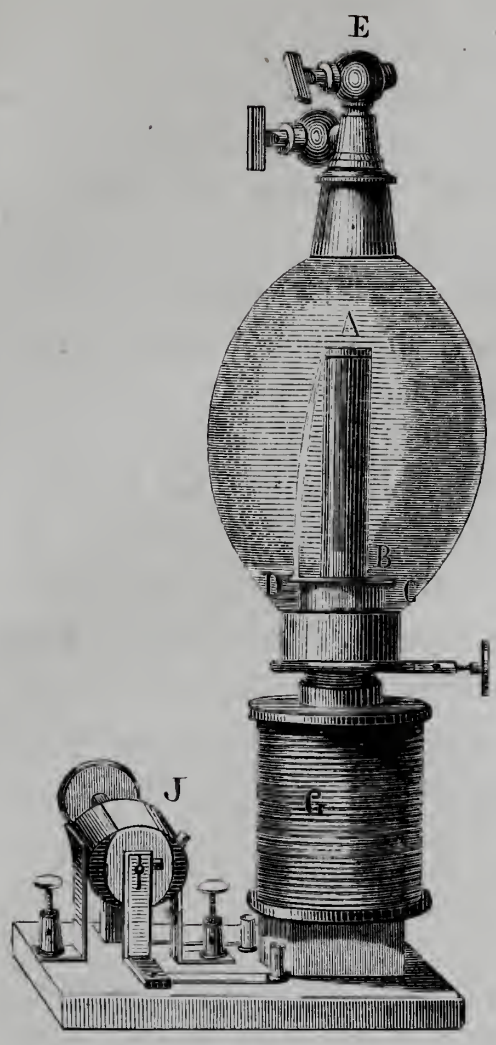


Fig. 28 *ter*.

moyen d'un bouton extérieur, placé à droite de l'appareil, permet aux décharges électriques de s'établir dans le ballon entre l'anneau et la partie supérieure A de la barre de fer. Pour atteindre ce but, la barre étant en rapport avec le fer doux de l'électro-aimant, il suffit de faire communiquer ce fer doux avec une des extrémités polaires d'un appareil d'induction analogue à celui représenté fig. 28 *bis*, dont l'autre extrémité polaire touche au bouton en relation avec l'anneau CD.

L'air du ballon peut être raréfié au moyen d'un des deux robinets qui sont à la partie supérieure et qui mettent l'appareil en rapport avec une machine pneumatique. Quand la raréfaction est suffisante, les décharges électriques répétées de l'appareil d'induction produisent une gerbe lumineuse AD qui reste fixe quand l'électro-aimant est à l'état naturel, mais qui prend un mouvement de rotation autour de la barre en fer AB quand l'aimantation de G a lieu ; le sens de ce mouvement dépend, non-seulement du sens du passage des décharges, mais encore du sens de l'aimantation que l'on peut faire changer à volonté au moyen du commutateur J.

Quand on opère avec de l'air ordinaire, la gerbe lumineuse est rougeâtre comme les décharges électriques qui ont lieu dans les mélanges gazeux raréfiés où l'azote domine; mais si à l'aide d'un robinet à capsule E, placé à la partie supérieure du ballon, on introduit dans l'intérieur un peu d'un liquide, volatil comme l'alcool, l'éther, le sulfure de carbone, etc., en raréfiant le mélange d'air et de vapeur le phénomène a lieu comme précédemment, mais la teinte est différente et devient en général verdâtre ou blanchâtre.

On peut considérer la gerbe lumineuse comme le résultat de la transmission de l'électricité par l'intermédiaire des particules gazeuses, ainsi qu'on l'a expliqué précédemment, et dès lors cette

succession de molécules incandescentes constitue un conducteur mobile parcouru par des courants électriques et pouvant subir l'action des aimants comme les conducteurs métalliques parcourus par l'électricité. On est donc ici dans le cas d'un courant rectiligne mobile qui se met en rotation autour du pôle d'un aimant, car la tige AB ne fait que prolonger le pôle supérieur de l'électro-aimant G.

M. Delarive a également employé plusieurs dispositions curieuses pour donner aux jets de lumière une direction perpendiculaire à celle de la barre centrale aimantée et afin de se placer à peu près dans les conditions nécessaires pour figurer la position des rayons auroraux lors de l'apparition de la couronne boréale. Le phénomène est le même qu'avec l'appareil précédent; mais l'apparence et la position des rayons lumineux peuvent varier suivant la disposition des récipients et le degré de raréfaction des gaz et des vapeurs. D'après cela, les décharges électriques qui ont lieu dans les régions supérieures de l'atmosphère doivent subir l'influence du magnétisme du globe et recevoir une direction en rapport avec celle de l'axe magnétique de la terre.

# LIVRE VI.

## EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR L'ACTION DE LA LUMIÈRE.

## CHAPITRE PREMIER.

### Substances dont la phosphorescence est de longue durée. — Phosphores artificiels.

§ 1. *Substances phosphorescentes diverses.*

La phosphorescence produite par l'action des rayons lumineux, consiste en ce que si l'on expose pendant quelques instants à l'action de la lumière solaire ou diffuse, ou à celle des rayons émanés d'une source lumineuse de quelque intensité, certaines substances minérales ou organiques, ces matières deviennent immédiatement lumineuses par elles-mêmes, et brillent alors dans l'obscurité avec une lueur dont la couleur et la vivacité dépendent de leur nature et de leur état physique; la lueur qu'elles émettent ainsi diminue graduellement d'intensité pendant un temps qui varie depuis plusieurs secondes jusqu'à plusieurs heures. Quand on expose de nouveau ces substances à l'action du rayonnement, le même effet se reproduit. L'intensité de la lumière émise, même pendant les premiers instants, est toujours beaucoup moindre que celle de la lumière incidente.

On a déjà dit dans l'historique, livre Ier, page 16, qu'il n'était pas probable que ces phénomènes aient été remarqués d'abord avec des pierres précieuses, mais qu'en 1602 ou 1603 la pierre de Bologne calcinée avait montré ce phénomène d'une manière bien évidente; on a observé ensuite des effets analogues avec des diamants, puis en 1675 avec le phos-

phore de Baudoin (résidu de la calcination du nitrate de chaux), et plus tard avec les corps dont il va être question.

Pour observer les effets lumineux produits par l'action propre des corps, il faut que l'observateur soit placé depuis quelque temps dans une chambre obscure, et qu'au volet de la fenêtre soit pratiquée une ouverture, de façon que l'observateur qui se tient à côté, les yeux fermés, puisse exposer les substances à l'action de la lumière, refermer l'ouverture, et examiner ensuite immédiatement les corps qui ont reçu l'impression du rayonnement. On reconnaît alors, par ce moyen, qu'un très-grand nombre de minéraux, de sels, de substances organiques, luisent ainsi pendant une ou plusieurs secondes après l'action du rayonnement solaire. L'action directe de la lumière solaire est préférable; cependant, pour les corps les plus impressionnables il suffit de l'influence de la lumère diffuse.

Ces effets se produisent également avec d'autres sources lumineuses que le soleil, mais avec une intensité qui dépend de l'intensité même de la lumière incidente et de sa composition; ainsi le sulfure de calcium, dont on parlera plus loin, peut être rendu actif à l'aide de la lumière d'une bougie; mais d'autres substances, moins impressionnables, ne reçoivent pas de cette source une action suffisante pour devenir lumineuses. La lumière des étincelles et des décharges électriques, au contraire, a une intensité très-grande; aussi sous son action les substances même faiblement phosphorescentes par insolation peuvent-elles devenir lumineuses dans l'obscurité (1). Du reste, la durée si courte de l'étincelle électrique, suffisante néanmoins pour rendre lumineuses les substances phosphorescentes, montre que le temps nécessaire pour que les substances impressionnables deviennent actives est extrêmement court. Ce temps nécessaire pour impressionner les corps, et qui est variable suivant leur nature, sera étudié dans le cours de ce chapitre.

Les effets de phosphorescence par insolation, comme on l'a vu dans le livre Ier, ont été le sujet de recherches plus nombreuses que ceux qui sont dus à l'action de la chaleur; mais on a plutôt examiné quelles étaient les substances qui étaient les plus lumineuses, au lieu d'étudier le mode d'action de l'agent lumineux et les circonstances qui influent non-seulement sur l'intensité, mais encore sur la réfrangibilité et la durée de la lumière émise.

(1) Becquerel, *Traité d'électricité* en 7 vol., t. 1, p. 45, et t. 6, p. 284. — *Traité de physique*, t. 2, p. 150.

Plusieurs des physiciens dont il a été question dans le livre 1er, pour expliquer l'effet produit avaient comparé les corps phosphorescents à des éponges s'imprégnant de lumière, et qui une fois à l'obscurité émettaient la lumière absorbée. Mais cette comparaison n'est pas tout à fait juste : car si l'influence du rayonnement sur une substance impressionnable donne lieu à une persistance dans l'impression que la lumière exerce sur elle, la partie du rayonnement qui produit cet effet est en général plus réfrangible que le violet visible, et se trouve formée des rayons dont les vitesses de vibration sont les plus grandes ; et cependant la lumière émise par la substance après l'action du rayonnement a une réfrangibilité moindre. En d'autres termes, dans la plupart des cas, mais non pas dans tous, la phosphorescence résulte d'une émission de rayons de plus faible réfrangibilité, et par conséquent d'une vitesse de vibration moindre que celle des rayons qui, par leur influence, donnent lieu au phénomène.

Je n'ai pas l'intention de présenter un tableau de tous les corps jouissant de la propriété d'émettre de la lumière après une exposition préalable au rayonnement lumineux, car cette propriété est beaucoup plus générale qu'on ne le suppose habituellement, surtout si l'on se place dans l'obscurité pendant un quart d'heure ou une demi-heure avant d'opérer, et qu'on examine les corps immédiatement après les avoir exposés à la lumière. Je me bornerai à citer ceux dans lesquels ces propriétés sont les plus marquées à la température ambiante, et en se servant simplement du mode d'observation qui vient d'être indiqué. On verra plus loin comment, à l'aide d'une autre méthode expérimentale, on peut étendre beaucoup plus encore le nombre des matières impressionnables à l'action de l'agent lumineux.

Les substances les plus lumineuses sont d'abord les sulfures alcalino-terreux, c'est-à-dire les sulfures de calcium, de barium et de strontium ; les deux premiers donnent les phosphores de Canton (jaune ou vert), et de Bologne (généralement orangé). Ces matières, quand elles sont bien préparées, peuvent luire pendant plusieurs heures dans l'obscurité après l'action solaire, mais en présentant des lueurs décroissant rapidement d'intensité dans les premiers instants, puis allant ensuite en s'affaiblissant plus lentement. Il n'est pas besoin de dire que la lueur est émise dans le vide comme dans les gaz, et que l'action n'est accompagnée d'aucun effet chimique ; elle est donc le résultat d'une modification physique temporaire. Parmi ces sulfures métalliques, en géné-

ral ceux de strontium et de barium offrent une plus grande vivacité dans l'émission de la lumière, et ceux de calcium donnent une plus grande variété de teintes.

Le sulfure de zinc obtenu dans des conditions particulières, comme on le verra dans le second paragraphe de ce chapitre, peut être phosphorescent à un aussi haut degré que ces substances. Les sulfures des métaux alcalins ne donnent aucun effet, ou du moins aucune action comparable à celle manifestée par ces matières; quant aux autres composés de strontium, de barium et de calcium, à l'exception peut-être des séléniures, ils ne paraissent pas offrir des actions aussi énergiques.

Après les sulfures que l'on vient de citer, on peut placer quelques minéraux, et en particulier un grand nombre de diamants et la plupart des échantillons de fluorure de calcium; mais tous les diamants ainsi que tous les fragments de fluorure de calcium ne sont pas lumineux, et il en est de même des sulfures cités précédemment, qui ne luisent point s'ils ne sont pas préparés convenablement, quoique ayant même composition chimique. Parmi les diamants, d'après Dufay, les diamants jaunes sont ordinairement les plus lumineux; cependant il y en a beaucoup de blancs, de bleus, etc., qui sont très-phosphorescents; la lueur émise est en général jaunâtre ou bleuâtre.

Quant à la chaux fluatée, c'est surtout la variété verte, connue sous le nom de *chlorophane*, qui est bien lumineuse par insolation; elle émet une lumière légèrement bleue-verdâtre. On dit généralement que la chaux fluatée blanche est à peine phosphorescente : je possède cependant un échantillon de cette matière, qui est très-blanc et très-limpide, et qui donne presque autant de lumière par insolation que la chlorophane verte, tandis que d'autres échantillons en apparence identiques ne donnent que de faibles effets. On retrouve donc des résultats analogues à ceux que l'on observe avec les diamants, et on ne connaît pas encore les causes qui modifient l'état moléculaire de ces corps de façon à les rendre plus ou moins phosphorescents ou à les laisser inactifs.

Le diamant et le fluorure de calcium n'offrent pas une grande vivacité de lumière, mais ils restent assez longtemps lumineux; ainsi j'ai vu un fragment de fluorine verte et deux diamants blancs émettre encore de la lumière une heure après l'insolation, ce qui indique que ces matières ont une grande *capacité* pour la phosphorescence, si l'on peut s'exprimer ainsi.

L'action de la chaleur ne modifie pas notablement le pouvoir que

possèdent les matières précédentes d'être lumineuses par insolation, pourvu que la température reste la même au moment de l'observation. Cette question, au reste, sera traitée dans la suite de ce livre.

Un très-grand nombre de minéraux et de sels peuvent être cités après les substances précédentes, mais ils ne luisent souvent que pendant plusieurs secondes et quelquefois, mais rarement, pendant plusieurs minutes après l'action de la lumière; ces substances sont en général à base alcaline ou terreuse. Tels sont la leucophane, dont il a déjà été question dans le livre III, page 53, et la topaze de Sibérie (1).

Parmi les composés à base de chaux on peut distinguer, après le fluorure de calcium, l'arragonite et certains calcaires, principalement les calcaires concrétionnés (assez vivement lumineux verts pendant un temps qui peut aller jusqu'à dix à quinze secondes); la craie (lumineuse verdâtre); la chaux phosphatée, arséniatée, sulfatée; le nitrate de chaux desséché (phosphore de Baudoin, blanc-verdâtre); le chlorure de calcium desséché (bleuâtre); le cyanure de calcium, etc. Quant à la chaux elle-même, elle n'est pas lumineuse; suivant Dessaignes, elle peut présenter cet effet lorsqu'elle est hydratée; mais est-on certain qu'il n'y ait pas eu mélange de carbonate?

Un grand nombre de composés de strontium et de barium sont également lumineux; on peut citer entre autres le chlorure de barium, les cristaux de sulfate de strontiane (bleuâtres) et ceux de sulfate de baryte; les cristaux de carbonate de strontiane et de baryte (verts-jaunâtres); ces mêmes substances étant à l'état de précipités; les acétates de ces bases (verdâtres), etc. Il est à remarquer que parmi les sels de calcium le nitrate est un des plus lumineux, l'acétate l'étant peu; tandis que les nitrates de baryte et de strontiane sont peu phosphorescents et que les acétates de ces bases luisent avec assez d'intensité.

On observe également des effets très-marqués avec les substances suivantes : la magnésie; le carbonate de magnésie; la soude caustique fondue, ainsi que la potasse (bleuâtre); les sulfates de potasse ou de soude avec ou sans eau de cristallisation; le fluorure de sodium (bleuâtre); le chlorure de sodium desséché (jaunâtre); le chlorure de potassium; les iodures et nitrates de soude et de potasse; le cyanure de potassium (blanc bleuâtre); le carbonate de glucyne (verdâtre); l'acide succinique, le borax, l'acide oxalique, l'acide tartrique, etc.

(1) Dufay, *Mémoires de l'Acad. des sciences*, t. 53. — Dessaignes, *Journal de physique*, t. 55, p. 61.

Il est facile de montrer que l'état moléculaire, ou une certaine quantité d'eau de cristallisation, exerce une grande influence sur quelques-unes de ces substances, car en les fondant on peut leur faire perdre leur pouvoir de phosphorescence. Ainsi le nitrate de chaux, le chlorure de calcium, le sulfate de soude, le sulfate de potasse, le chlorure de sodium, pris à l'état de dissolution ne sont pas phosphorescents; si on les dessèche à l'aide d'un courant d'air chaux, ils deviennent lumineux sous l'action solaire; quand on les fond, ils perdent en partie cette propriété pour l'acquérir de nouveau, au même degré, en repassant par l'état de dissolution.

Malgré que l'eau soit, dans certains cas, un obstacle à la production de la phosphorescence, puisque le chlorure de calcium et le nitrate de chaux ne sont pas lumineux quand ils en renferment une certaine quantité, cependant le sulfate de soude, même avec de l'eau de cristallisation, est lumineux; néanmoins, ce dernier sel est moins phosphorescent que lorsqu'il est desséché à 100 degrés.

On peut citer parmi d'autres corps également phosphorescents le sel ammoniac, l'acide arsénieux, assez vivement lumineux vert jaunâtre, le sulfate de magnésie, l'alun. Le quartz cristalisé, en général, n'est pas lumineux; cependant, l'on verra plus tard que dans certaines conditions il peut le devenir. Le verre qui n'a pas été préalablement chauffé n'est pas lumineux par le mode d'observation dont il est question ici, c'est-à-dire de manière à présenter une emision lumineuse de quelque durée; suivant Dessaignes (1), après avoir été chauffé il le devient, pour perdre de nouveau cette propriété quelque temps après; mais il la reprend par une élévation nouvelle de température pour la perdre encore ensuite. Il est possible que les changements d'hygroscopicité du verre soient causes de ces différents effets.

Les composés métalliques sont rarement lumineux, surtout ceux qui sont produits par la voie sèche. On peut cependant citer parmi les exceptions la blende ainsi que les oxydes de plomb et de zinc.

Les matières organiques sont quelquefois bien lumineuses après l'action du rayonnement solaire ou d'une vive lumière artificielle; telles sont le papier, surtout le papier desséché, la soie, le sucre, le succin, le sucre de lait, la gomme arabique, les dents, etc. Quant aux liquides et aux gaz, on n'en a pas encore observé qui soient lumineux après l'in-

(1) *Journal de physique*, t. 71, p. 351.

solation et par le procédé décrit plus haut. Il semble que l'état de mobilité de leurs particules soit en général contraire à l'état moléculaire dans lequel doivent se trouver les corps pour qu'ils manifestent la phosphorescence après l'action de la lumière ; cependant, comme on le verra plus tard, les liquides peuvent présenter des effets de ce genre quand on a recours à d'autres moyens d'investigation.

Pour observer les différents effets qui viennent d'être cités, on s'est borné à exposer les corps à la lumière solaire ou diffuse et à les rentrer dans l'obscurité, de sorte qu'il se passe au moins une seconde entre le moment où ils cessent d'être frappés par les rayons solaires et celui où l'observateur les regarde; mais on verra plus loin qu'en examinant ces corps une fraction de seconde après l'action du rayonnement lumineux on reconnaît que certains d'entre eux, avec lesquels on n'avait pas encore observé la propriété de phosphorescence donnent une émission de lumière.

J'ai déjà dit précédemment que la lumière des décharges électriques, dont l'intensité est si vive et qui contient une plus grande quantité de rayons très-réfrangibles que la lumière solaire, agissait plus énergiquement que celle-ci; en effet, les expériences de phosphorescence faites par son intermédiaire peuvent être considérées comme de très-belles démonstrations des phénomènes dont il est question.

On n'a parlé jusqu'ici que de la lumière émise par différentes substances plus ou moins phosphorescentes, sans distinction de sa couleur ou de sa réfrangibilité. Les lueurs phosphoriques peuvent présenter les différentes couleurs prismatiques depuis le rouge orangé jusqu'au violet, mais je n'ai pas observé de teinte rouge correspondant à l'extrémité rouge du spectre solaire et par conséquent aux raies A et B. Avec des corps de même nature on peut obtenir différentes nuances; ainsi l'on a dit qu'il y avait des diamants qui étaient lumineux orangés, d'autres bleus; je n'ai pas été à même de constater ces derniers effets, et les diamants que j'ai pu étudier ont donné une lueur jaunâtre ou verdâtre plus ou moins bleuâtre. En général, avec les substances salines et les minéraux, les teintes prédominantes sont blanches avec une légère coloration verdâtre ou jaunâtre; mais on verra plus loin qu'avec les sulfures alcalino-terreux la même substance préparée artificiellement peut présenter les différentes teintes prismatiques depuis le rouge orangé jusqu'au violet.

§ 2. *Sulfures phosphorescents. Couleur de la lumière émise à la température ordinaire.*

Les substances qui sont lumineuses au plus haut degré après l'action du rayonnement lumineux sont les sulfures alcalino-terreux, lesquels ont reçu spécialement le nom de *phosphores artificiels;* du reste, ce sont principalement certains sulfures de calcium et de barium qui avaient servi aux recherches faites dans le siècle dernier, et dont il a été question livre Ier, page 25 et suivantes. On avait bien observé, comme on l'a vu page 27, que suivant le mode de préparation les phosphores pouvaient présenter des nuances diverses, mais sans spécifier quelles étaient les causes de ces différences et s'il ne se produisait pas dans cette circonstance des corps dont la composition chimique n'était pas la même. Ayant été conduit à supposer que dans certains cas la même substance suivant son état physique était douée de propriétés lumineuses différentes, j'ai dû étudier à nouveau le mode de préparation de ces matières, si éminemment impressionnables, avec d'autant plus de raison que je suis parvenu à connaître les conditions nécessaires pour produire avec certitude telle ou telle lumière, ou bien tel ou tel effet après l'influence préalable du rayonnement lumineux.

On ne peut obtenir les sulfures phosphorescents qu'en les préparant par la voie sèche et au moyen d'une élévation de température assez forte. Ce mode de préparation donnant en général des mélanges de matières, il n'est pas possible de déterminer exactement la composition chimique des substances impressionnables; ce n'est que par induction, comme on le verra plus loin, que l'on peut en inférer la constitution probable, mais non certaine, de ces subtances.

Les sulfures de strontium, de calcium et de barium, quand on se place dans des conditions convenables, peuvent donner une émission de lumière parfois très-vive; s'il fallait classer ces corps d'après la facilité de leur préparation, les sulfures de strontium seraient en tête, exigeant une moindre élévation de température pour être obtenus; ceux de calcium viendraient en second lieu, puis ceux de barium. Quant à la réfrangibilité des rayons émis par ces sulfures, on peut dire qu'avec les composés de strontium ce sont les teintes vertes et bleues qui dominent, c'est-à-dire celles de l'extrémité la plus réfrangible du spectre;

avec les sulfures de barium, ce sont au contraire les teintes orangées, jaunes et vertes, ou les teintes de la partie la moins réfrangible de l'image prismatique; mais avec les combinaisons du calcium on peut avoir toutes les nuances depuis le rouge orangé jusqu'au violet.

Quel que soit le mode de préparation des monosulfures alcalino-terreux, il se forme en même temps des polysulfures, des sulfates et des hyposulfites; cependant, d'après les résultats dont on va parler, il est probable que la plupart du temps ce sont les monosulfures qui donnent aux composés le pouvoir de phosphorescence, et que suivant leur état physique particulier ils sont doués de propriétés diverses et luisent avec des teintes différentes.

On peut citer à l'appui de cette assertion les résultats suivants : Si l'on prépare les sulfures au moyen de la réduction des sulfates de chaux, de baryte ou de strontiane par le charbon, quelle que soit la température et la durée de l'opération, le pouvoir de phosphorescence du composé formé dépend de l'état primitif du sulfate; ainsi le sulfate de baryte cristallisé naturel donne une matière lumineuse jaune-orangé (phosphore de Bologne); le sulfate de strontiane naturel de Sicile, à cristaux bacillaires, donne une lumière bleue-verdâtre, et comme l'effet est le même, que la décomposition du sulfate soit plus ou moins avancée, on est donc porté à croire que dans tous les cas ce sont les monosulfures qui forment les parties actives de ces composés phosphorescents. Bien plus, si l'on réduit par le charbon des sulfates obtenus dans des conditions différentes, alors les effets lumineux sont différents : ainsi le sulfate de strontiane précipité de l'acétate par le sulfate de soude donne une matière lumineuse verte-jaunâtre, et non pas bleuâtre, comme le sulfate cristallisé de Sicile; le sulfate de baryte, également précipité dans les mêmes conditions, donne une matière phosphorescente verdâtre, et comme il se produit des monosulfures de même que précédemment, leur arrangement moléculaire seul doit être cause des différences observées, car il n'est pas probable que ces sulfures provenant de réactions chimiques analogues soient chimiquement différents.

On verra, au reste, dans un autre chapitre que la chaleur peut exercer sur quelques-uns de ces sulfures une action telle que ces corps acquièrent temporairement la faculté de luire avec presque toutes les nuances du spectre, suivant la température à laquelle ils sont élevés; quand on les ramène de nouveau à la température ambiante, ils reprennent leur pouvoir de phosphorescence qu'ils avaient avant l'expérience. Ces résultats

montrent donc que la composition chimique n'est pas la seule cause de ces changements, mais que l'état physique de la substance intervient dans la production de ces effets.

On peut citer encore le fait suivant, qu'il est utile de connaître, mais qui ne permet pas cependant de tirer la même induction : si l'on prépare des sulfures de barium et de strontium de manière à luire avec différentes teintes, violettes, jaunes, vertes, en les traitant par l'eau, les résidus ne sont plus phosphorescents, et les parties actives entrent en dissolution dans l'eau; en évaporant à siccité ces dissolutions, les résidus ne deviennent lumineux que si on élève leur température au rouge pendant quelques instants, mais alors ils présentent une teinte en général uniforme et qui est verte pour le sulfure de strontium et un peu plus jaune pour celui de barium. Ainsi l'action différente des phosphores dont on a fait usage ne se trouve pas conservée, puisqu'en passant par l'état de dissolution et par une élévation de température ultérieure les sulfures de chaque base présentent des effets semblables. Ce résultat provient, ou de la formation d'un oxysulfure, qui par l'action de la chaleur donne un sulfure toujours lumineux de même nuance, ou bien de ce que les états moléculaires primitivement différents de ces sulfures sont modifiés et ramenés à présenter une action uniforme.

Ces expériences mettent encore en évidence ce fait constaté déjà depuis longtemps, c'est que l'état de dissolution n'est pas celui dans lequel il faut prendre les corps pour observer les effets de phosphorescence par l'action du rayonnement lumineux.

Le sulfure dont il va d'abord être question est le sulfure de calcium, non-seulement en raison de la diversité des teintes qu'il présente, mais encore par le grand nombre d'échantillons de carbonate calcaire que j'ai pu faire servir à la préparation des matières impressionnables. Les couleurs émises par phosphorescence et indiquées ci-après sont celles que l'on observe lorsqu'à la température ordinaire les substances sont exposées à la lumière solaire ou diffuse, puis rentrées rapidement dans l'obscurité.

### *Sulfures de calcium.*

On peut obtenir des sulfures de calcium à l'aide d'un grand nombre de réactions donnant le plus souvent des mélanges de matières différentes; bien que, d'après ce qui a été dit plus haut, on soit porté à

croire que les effets lumineux présentés par ces matières résultent principalement de l'action du monosulfure de calcium, cependant, pour exprimer uniquement les faits observés, on peut se borner à dire que ces réactions conduisent à des phosphores très-remarquables au point de vue des effets physiques, et eu égard aux considérations sur l'arrangement moléculaire que l'on peut déduire des phénomènes observés. On peut distinguer parmi ces réactions celles qui résultent 1° de l'action directe du soufre, 2° de l'action des sulfures, 3° de la réduction du sulfate de chaux.

*Action directe du soufre.* L'action du soufre sur la chaux et sur les carbonates, acétates, oxalates, nitrates de la même base, donne lieu à des masses douées de pouvoirs phosphorescents différents. Après avoir fait agir le soufre en vapeur sur ces composés, j'ai reconnu qu'il était préférable, ainsi qu'on l'avait fait antérieurement, de mélanger une certaine quantité de fleur de soufre à ces matières convenablement divisées, et d'élever la température des mélanges jusqu'au degré convenable.

Les anciennes préparations de sulfure de calcium phosphorescent étaient obtenues généralement avec des coquilles d'huîtres calcinées : ce mode de préparation donne en effet de la chaux dans un grand état de division, état éminemment favorable à la manifestation de la phosphorescence ; aussi le phosphore de Canton provient-il de la calcination d'un mélange de coquilles déjà calcinées et de soufre, dans la proportion de 3 de matière pour 1 de soufre. Mais comme les coquilles d'huîtres calcinées renferment en outre une petite quantité de sulfure provenant de la réduction du sulfate de chaux par les matières organiques ainsi que d'autres substances étrangères, il est préférable d'agir avec des corps dont la composition est bien déterminée.

Quand on veut préparer un sulfure phosphorescent avec de la chaux ou du carbonate de chaux, les proportions les plus convenables sont celles dans lesquelles sur 100 parties de matière en emploie 85 pour 100 de fleur de soufre dans le premier cas, et 48 pour 100 dans le second cas, c'est-à-dire lorsqu'on emploie les quantités de soufre qui seraient nécessaires pour être brûlées par l'oxygène de la chaux ou du carbonate et pour produire un monosulfure. On mélange les matières intimement, puis on les place dans un creuset en terre, au milieu d'un fourneau à réverbère alimenté avec du charbon de bois. On opère en général sur 10 à 20 grammes de matière. Si l'élévation de température

a été convenable et la durée de l'action de la chaleur suffisante, on retire du creuset après le refroidissement une masse lumineuse par insolation.

Il faut avoir égard dans la préparation à l'élévation de la température ainsi qu'à sa durée. En opérant en effet avec de la chaux provenant de l'arragonite fibreuse, et en portant le creuset à une température inférieure à 500 degrés pendant un temps suffisant pour que, la réaction entre le soufre et la chaux ayant lieu, le soufre en excès soit éliminé, on a une masse faiblement lumineuse avec une teinte bleuâtre; si cette masse est portée à une température de 800 à 900 degrés et ne dépasse pas la fusion de l'argent ou de l'or, et cela pendant vingt-cinq à trente minutes, alors la masse offre par phosphorescence une teinte lumineuse verte très-vive. Il faut toutefois faire remarquer que la composition chimique des deux substances n'est pas la même; cette différence d'effet néanmoins est à signaler, car avec le carbonate de chaux la réfrangibilité de la lumière émise ne varie pas autant avec l'élévation de la température qu'en opérant avec la chaux.

En général, si l'élévation de température est trop vive ou trop prolongée, toute trace de phosphorescence disparaît dans la matière; ainsi, en se servant d'un fourneau à réverbère alimenté avec du coke, l'élévation de température acquise au bout d'un quart d'heure suffit pour donner ce résultat. Il est donc préférable de faire usage d'un fourneau à réverbère ordinaire alimenté avec du charbon de bois et semblable à ceux qui servent dans les laboratoires de chimie, ou bien de la moufle d'un fourneau de coupellation.

On détermine de la manière suivante la durée de l'action calorifique nécessaire pour avoir le maximum d'effet : on met simultanément dans le fourneau, ou dans la moufle, plusieurs creusets contenant une même quantité du mélange soumis à l'expérience; puis, à partir du moment où les creusets sont portés au rouge-blanc, on les retire de cinq en cinq minutes ou de dix en dix minutes, et l'on compare les différentes matières ainsi obtenues. Avec la chaux et le carbonate de chaux, vingt-cinq à trente minutes de calcination donnent le maximum d'effet. Souvent on remarque que la masse centrale de la matière phosphorescente présente une nuance lumineuse un peu différente de celle des portions qui touchent au creuset ou bien qui se trouvent à la partie supérieure; cet effet provient probablement de l'action de l'oxygène ou de la vapeur d'eau sur les portions de matières dont il s'agit, et dans

les préparations dont il va être question on notera les circonstances dans lesquelles il a été observé. Du reste, on a eu soin en général de ne prendre que les effets donnés par la masse centrale de la substance phosphorescente.

Fréquemment, surtout lorsqu'il s'agit de la préparation des phosphores au moyen des carbonates, il est préférable de broyer de nouveau la matière déjà calcinée et d'y mélanger du soufre, afin de lui faire subir une deuxième et même une troisième calcination, et l'on obtient alors une masse phosphorescente homogène ; tel est l'effet que l'on observe lors de la calcination du mélange de spath d'Islande pulvérisé et de soufre, ainsi que de celle du carbonate de strontiane.

En opérant dans les conditions précédentes à l'aide des carbonates ou des oxydes préparés par élévation de température, ces substances étant divisées et tamisées avec soin, et mélangées avec les proportions de soufre indiquées plus haut, on a eu les résultats suivants, en ayant soin de luter les couvercles des creusets contenant les mélanges :

| MATIÈRES MÉLANGÉES AU SOUFRE. | COULEUR DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR PHOSPHORESCENCE APRÈS L'INSOLATION. |
|---|---|
| Spath d'Islande très-pur. | Jaune orangé. |
| Chaux de spath. | Jaune orangé moins vif. |
| Marbre blanc (de Carrare). | Jaune, lumière émise très-faible. |
| Chaux de marbre blanc. | Jaune, lumière émise très-faible. |
| Chaux de coquilles d'huîtres. | Jaune (phosphore de Canton). |
| Chaux de calcaire grossier, ou bien hydrate de chaux. | Jaune, lumière très-faible. |
| Craie et chaux de craie. | Jaune, lueur à peine visible. |
| Arragonite de Vertaison (crist. bacill.) | Verte, intensité lumineuse moyenne. |
| Chaux d'arragonite. | Verte, lumière faible. |
| Arragonite fibreuse. | Teinte dominante violette ; quelques parties verdâtres. |
| Chaux d'arragonite fibreuse. | Verte, phosphorescence très-vive. |

On voit que le calcaire et l'arragonite ne donnent pas les mêmes

effets; le premier donne une lumière jaune et la deuxième une lumière en général verte. On doit remarquer, au reste, que la réfrangibilité de la lumière émise ne tient pas à l'action de la chaleur ni à sa durée, car on obtient les mêmes effets de couleur en élevant la température de la masse au-dessus du rouge à des degrés différents; mais l'intensité lumineuse en dépend, car on obtient des matières plus ou moins phosphorescentes, et qui peuvent même cesser de l'être si l'on ne prend pas les précautions indiquées plus haut.

Il est curieux de rapprocher ces effets des phénomènes de phosphorescence que présentent les carbonates de chaux eux-mêmes avant toute réaction : en effet, le spath d'Islande n'est pas lumineux dans les conditions ordinaires; mais en se servant du procédé qui sera indiqué plus loin, on trouve qu'il émet des rayons de teinte orangée. L'arragonite au contraire est assez vivement lumineuse après l'insolation, et donne une émission de rayons verts. Ces résultats tendent donc à indiquer que l'état particulier de ces carbonates se conserve encore dans les sulfures que l'on obtient après leur calcination préalable avec le soufre. Ces effets paraissent peut-être tenir à d'autres causes que celles d'où dépend l'état cristallin; car si l'on échauffe l'arragonite jusqu'à ce qu'elle se brise, on admet qu'elle se transforme alors en petits cristaux spathiques; mais la masse sous cette forme conserve la faculté d'être phosphorescente avec une nuance verte à peu près semblable, et ne donne pas de lumière orangée comme le spath. D'un autre côté, nous allons voir qu'en faisant subir d'autres réactions à ces deux carbonates de chaux on tend à leur donner un pouvoir de phosphorescence uniforme, différent des deux précédents, et de telle manière que leurs sulfures présentent une teinte violette.

J'ai voulu voir quels étaient les effets produits en attaquant ces carbonates ou leurs bases par des acides, en formant ainsi des sels solubles, et en précipitant de nouveau ces sels par un carbonate alcalin, afin d'examiner de quelle manière les effets différents présentés par le spath, l'arragonite et d'autres calcaires seraient modifiés après ces diverses réactions chimiques. J'ai reconnu d'abord qu'il faut faire dissoudre les carbonates ou les bases de façon à ce que la dissolution soit neutre ou, mieux encore, légèrement alcaline; on précipite ensuite la chaux par un équivalent de carbonate d'ammoniaque, et cela à la température d'ébullition du sel de chaux, puis on lave longtemps le précipité de carbonate formé. Il est nécessaire que le sel de chaux reste en dissolution et ne soit pas dessé-

ché ni fondu préalablement avant de servir à la préparation du carbonate, car sans cela les effets pourraient être modifiés : ainsi, en se servant d'acide nitrique, si l'on évaporait les différents nitrates de chaux jusqu'à siccité et qu'on les fît fondre de façon à atteindre la fusion ignée et la décomposition du nitrate, ils donneraient tous ensuite un carbonate qui calciné avec du soufre présenterait une masse phosphorescente violette d'une manière à peu près uniforme.

Les résultats contenus dans les deux tableaux pages 222 et 223 ont été obtenus en traitant le même poids de chaux ou de carbonate par les mêmes quantités d'acide nitrique ou chlorhydrique, et en se servant des mêmes quantités d'eau et de carbonate d'ammoniaque afin d'obtenir le carbonate de chaux précipité ; on a opéré à la même température, et les expériences ont été répétées à plusieurs reprises :

On reconnaît d'abord que les carbonates naturels étant transformés en chaux, puis ensuite la chaux servant à préparer les nitrates qui, précipités par le carbonate d'ammoniaque, donnent de nouveau des précipités de carbonate de chaux, ces derniers présentent après leur calcination avec le soufre une teinte verte plus ou moins caractéristique, mais qui est très-vive quand il s'agit d'arragonite fibreuse ; dans ce dernier cas, on obtient un des plus beaux phosphores artificiels que l'on puisse préparer (vert légèrement bleuâtre). Mais si, au lieu de transformer préalablement les carbonates en chaux, on les attaque directement par l'acide nitrique, les matières obtenues donnent par phosphorescence une lumière orangée, jaune ou violette.

On voit en outre qu'après plusieurs transformations successives les carbonates de chaux traités par le soufre donnent une phosphorescence violette, comme lorsqu'on fond préalablement les nitrates desséchés. Ainsi, la cause ou l'arrangement moléculaire en vertu duquel le spath, l'arragonite et différents calcaires se comportent diversement quant aux teintes de la lumière émise après l'action du rayonnement solaire, se conserve encore dans quelques circonstances après la dissolution dans les acides et même après la transformation de ces carbonates en chaux par l'action de la chaleur ; mais, après plusieurs transformations ou certaines réactions, telles que la fusion ignée des sels formés, toute trace de l'origine primitive du carbonate disparaît, et les différents composés tendent à donner une seule et même teinte lumineuse par phosphorescence, laquelle est autre que celles que l'on observe avant ces transformations.

| A. | B. | | C. | | D. | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | PREMIÈRE SÉRIE D'OPÉRATIONS. | | DEUXIÈME SÉRIE D'OPÉRATIONS. | | TROISIÈME SÉRIE D'OPÉRATIONS. | |
| Composés servant à préparer les carbonates. | On change en nitrate ou en chlorure les composés A, puis on précipite le sel soluble de chaux par le carbonate d'ammoniaque, et l'on chauffe avec le soufre le carbonate obtenu. | | On traite les carbonates de chaux B par les acides nitrique ou chlorhydrique. On précipite de nouveau par le carbonate d'ammoniaque et on chauffe avec le soufre le carbonate de chaux obtenu. | | On transforme les carbonates de chaux B en chaux par calcination, on attaque ces derniers par les acides nitrique ou chlorhydryque et on précipite par le carbonate d'ammoniaque. On chauffe avec le soufre le carbonate obtenu. | |
| | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. |
| Spath d'Islande.... | Ac. nitrique.. | Jaune. | » | » | » | » |
| Chaux de spath.... | A . nitrique.. | Verdâtre et jaunâtre, le vert domine (lumière faible). | | | | |
| Marbre blanc..... | Ac. nitrique.. | Violet rose, quelques parties orangées. | » | » | » | » |
| Coquilles d'huîtres. | Ac. nitrique.. | Teinte verte dominante; quelques parties jaunâtres et violettes. | » | » | » | » |
| | » | | | | | |
| | » | | | | | |
| | Ac. chlorhyd. | Jaune. Quelques points près du creuset sont violets. | | | | |
| | » | | | | | |
| | » | | | | | |
| Chaux de coquilles d'huîtres..... | Ac. nitrique. | Verte, lumière assez vive. | | | | |
| | Ac. chlorhyd. | Teinte dominante violette; quelques parties sont vertes. | | | | |
| | » | | | | | |
| | » | | | | | |
| Chaux de tests de crustacés..... | Ac. nitrique.. | Verte, lumière vive. | | | | |

| A. | B. | | C. | | D. | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | PREMIÈRE SÉRIE D'OPÉRATIONS. | | DEUXIÈME SÉRIE D'OPÉRATIONS. | | TROISIÈME SÉRIE D'OPÉRATIONS. | |
| Composés servant à préparer les carbonates. | On change en nitrate ou en chlorure les composés A, puis on précipite le sel soluble de chaux par le carbonate d'ammoniaque, et l'on chauffe avec le soufre le carbonate obtenu. | | On traite les carbonates de chaux B par les acides nitrique ou chlorhydrique. On précipite de nouveau par le carbonate d'ammoniaque, et on chauffe avec le soufre le carbonate de chaux obtenu. | | On transforme les carbonates de chaux B en chaux par calcination; on attaque ces derniers par les acides nitrique ou chlorhydrique, et on précipite par le carbonate d'ammoniaque. On chauffe avec le soufre le carbonate de chaux obtenu. | |
| | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. | Acide saturant la chaux. | Lumière émise par phosphorescence. |
| Arrag. de Vertaison. | Ac. nitrique.. | Violette-rose. | | | | |
| Arragonite fibreuse. | Ac. nitrique.. | Verte, quelques parties jaunâtre et bleuâtre. | » | » | » | » |
| Chaux d'arragonite fibreuse..... | Ac nitrique.. | Verte, lumière très-vive. | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Violette-bleuâtre.<br>Violette-bleuâtre. | » | » |
| Craie (blanc d'Espagne)..... | Ac. nitrique.. | Jaune, lumière faible..... | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Jaune, lumière assez vive.<br>Jaune, lumière assez vive. | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Verte au centre, jaunâtre sur les bords.<br>Jaune, lumière assez vive. |
| Chaux de craie.... | Ac. nitrique. | Verte quelques parties bleuâtres; lumière faible. | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Violette-bleuâtre.<br>Violette-bleuâtre. | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Verte.<br>Violette-rose, lum. tr.-faib |
| Carbonate de chaux pur obtenu en traitant le chlorure de calcium cristallisé du commerce par le carbonate de soude. | Ac. nitrique. | Violette-rose..... | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd | Violette rose.<br>Violette rose. | Ac. nitrique.<br>Ac. chlorhyd. | Verte (phosphor. faible).<br>Violette-rose. |

On reconnaît également que la nature de l'acide qui attaque la chaux ou le carbonate a une influence sur la manière dont le carbonate précipité se comporte quand on le traite par le soufre. En effet, quand on se sert d'acide azotique, on a de préférence une teinte verte; l'acide chlorhydrique, au contraire, employé pour la transformation préalable en chlorure ne donne que des teintes jaunes ou violettes.

Les résultats suivants montrent quelle est l'influence de la nature de l'acide ou du sel de chaux, et celle du carbonate soluble qui donne le précipité de carbonate de chaux :

On a d'abord pris du carbonate de chaux précipité pur (donnant une très-belle teinte verte par calcination avec le soufre), puis on a traité un poids déterminé de ce carbonate par différents acides pour former des sels solubles, que l'on a précipités par un même poids de carbonate d'ammoniaque à la température de 100 degrés; les carbonates de chaux obtenus ont donné, après la réaction du soufre à la même température et pendant le même temps, les résultats suivants :

| NATURE DE L'ACIDE QUI A ATTAQUÉ LE CARBONATE DE CHAUX PRÉCIPITÉ. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR PHOSPHORESCENCE. |
|---|---|
| Acide azotique..... | Verte (teinte analogue, quoiqu'un peu plus faible, à celle émise par le composé formé directement avec le carbonate précipité avant d'être attaqué par l'acide). |
| Acide acétique..... | Verte, plus vive que la précédente. |
| Acide chlorhydrique... | Violette, le centre de la masse est légèrement verdâtre. |
| Acide lactique..... | Verte, plus jaunâtre qu'avec l'acide azotique. |
| Acide iodhydrique..... | Verte, teinte plus faible que la précédente. |

Ainsi les différences observées montrent bien l'influence de la nature du sel de chaux dissous sur l'état de précipité de carbonate formé dans les mêmes conditions de dissolution et de température.

Les résultats suivants ont été obtenus en traitant par le soufre le carbonate de chaux préparé avec l'eau de chaux et l'acide carbonique, ainsi que le carbonate de chaux obtenu en précipitant le chlorure de calcium cristallisé du commerce par différents carbonates alcalins.

| MODE DE PRÉPARATION DU CARBONATE DE CHAUX. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR PHOSPHORESCENCE. |
|---|---|
| Eau de chaux et acide carbonique. | Violette, lumière très-pure. |
| Chlorure de calcium cristallisé et carbonate d'ammoniaque à 100°. | Violette. |
| Chlorure de calcium et carbonate d'ammoniaque à la température ordinaire. | Violette, teinte plus faible que la précédente. |
| Chlorure de calcium et sous-carbonate de soude à 100 degrés. | Verte, un peu sombre. |
| Chlorure de calcium et carbonate d'ammoniaque à la température ordinaire. | Violette-bleuâtre faible. |
| Chlorure de calcium et sous-carbonate de potasse à 100 degrés. | Violacée faible. |

Ainsi non-seulement la nature du composé de calcium, mais encore la température de la dissolution et la nature du carbonate soluble ont une influence sur l'état du précipité, et donnent à la préparation la faculté d'émettre par phosphorescence des nuances diverses.

Ces différents effets permettent d'expliquer comment, lorsqu'on prépare le sulfure de calcium phosphorescent avec du carbonate de chaux pur dont on ne connaît pas l'origine, on peut avoir des effets lumineux plus ou moins brillants et des teintes diverses variables du jaune au violet : l'intensité lumineuse dépend le plus souvent de l'action de la chaleur, mais la réfrangibilité de la lumière émise dépend de l'état moléculaire de la combinaison de chaux. La teinte verte très-vive donnée par plusieurs précipités de carbonate tient peut-être à ce que ceux-ci présentent la forme de l'arragonite ; mais l'examen de ces précipités au microscope ne m'a pas permis de résoudre cette question. Je dois dire, en terminant ce sujet, que la matière phosphorescente verte obtenue dans les conditions indiquées plus haut est un des plus beaux phosphores et des plus persistants de tous ceux que j'aie pu préparer; on ne l'obtient pas toujours avec facilité.

Le soufre en agissant sur le nitrate de chaux desséché a donné un résidu de sulfure de calcium à peine lumineux avec quelques points jaune-orangé; ce résidu calciné de nouveau n'a pas donné d'autre nuance. L'oxalate de chaux calciné directement avec le soufre a donné également une phosphorescence de couleur jaune-orangée analogue à la précédente.

*Action des sulfures.* L'action des sulfures sur la chaux et sur les carbonates à la température rouge donne des effets analogues à celle du soufre, mais avec des différences dépendant sans doute de la température à laquelle ces sulfures sont décomposés, et dès lors de la température à laquelle la réaction a lieu entre le soufre qui en provient et la chaux. J'ai étudié l'influence d'un courant d'hydrogène sulfuré et de sulfure de carbone sur la chaux, sans obtenir aucun résultat bien net, si ce n'est une prédominance de matière lumineuse violette, ou plutôt de couleur lavande.

On a fait des mélanges de chaux, de carbonate de chaux, et même de fragments de coquilles d'huîtres, préalablement calcinés, avec des sulfures d'étain, de mercure, d'antimoine, de cuivre, de zinc, etc., sans trouver d'autres nuances que des nuances violettes, bleues et jaunes-verdâtres pâles. Deux seules réactions sont à noter ici : la réaction du sulfure d'antimoine sur la chaux, ainsi que celle du persulfure de potassium. Si l'on mélange de la chaux provenant du marbre blanc, par exemple, avec $\frac{1}{4}$ de son poids de sulfure d'antimoine, après trente minutes d'une élévation de température au rouge-blanc, on a une masse assez lumineuse jaune-verdâtre (vert pomme) ; des proportions différentes ainsi qu'une température plus ou moins élevée ou prolongée ne changent pas la nuance d'une manière appréciable, mais diminuent l'intensité lumineuse : il est probable, dans ce cas, qu'il se forme un antimonio-sulfure de calcium phosphorescent.

L'action du persulfure de potassium sur la chaux et sur le carbonate de chaux est beaucoup plus remarquable : Pour l'observer convenablement, il faut placer au fond d'un creuset un poids déterminé de persulfure de potassium (5 à 6 grammes par exemple), et recouvrir cette substance d'un petit têt percé d'ouvertures ; on place sur le têt le carbonate de chaux, la chaux ou la substance sur laquelle on veut faire réagir le persulfure, et l'on élève la température du creuset jusqu'au rouge blanc ne dépassant pas 900 ou 920 degrés, c'est-à-dire la fusion de l'argent : le persulfure est décomposé, et le soufre qui se dégage réagit sur la matière superposée. Le maximum d'effet est atteint au bout de quinze à vingt minutes, et il ne faut pas dépasser cette limite de durée de l'action calorifique. On peut également mélanger les composés de chaux avec $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{8}$ de leur poids de persulfure de potassium pulvérisé. Avec le carbonate de chaux, on obtient une masse offrant des teintes mélangées, mais où se trouvent des parties lumineuses vertes très-brillantes; avec des co-

quilles d'huîtres préalablement calcinées on a la plupart du temps des teintes vertes très-vives. La couleur de la lumière émise est analogue à celle que donne la matière phosphorescente préparée avec le soufre et certains carbonates de chaux, tels que le carbonate provenant de la chaux d'arragonite fibreuse.

On obtient quelquefois lors de la calcination des coquilles avec le persulfure de potassium, ou bien dans certaines circonstances que je n'ai pas encore pu bien préciser en agissant avec le persulfure de potassium et la chaux, une émission de lumière bleue indigo indiquant la production d'un phosphore que je n'ai obtenu jusqu'ici que par ce moyen; on trouve en effet, comme on le verra plus loin, que certains rayons du spectre agissent sur lui d'une manière spéciale. Ce phosphore présente un état physique particulier, que l'on peut obtenir aussi, mais temporairement, en maintenant entre 200 et 300 degrés le phosphore lumineux vert préparé par l'action du persulfure de potassium sur les coquilles d'huîtres, ou bien en portant à la même température le phosphore lumineux vert-bleuâtre produit en faisant réagir le soufre sur le carbonate formé au moyen du nitrate provenant de la craie calcinée et du carbonate d'ammoniaque.

J'ai observé un fait qui semblerait indiquer que la présence de la potasse est nécessaire à la préparation de la matière phosphorescente lumineuse bleue; ayant à deux reprises différentes préparé du sulfure de calcium lumineux vert que l'on peut obtenir facilement par les procédés décrits précédemment, ou bien à l'aide des coquilles appelées porcelaines comme on l'indiquera plus loin, j'ai arrosé la masse à l'aide d'une petite quantité d'eau tenant en dissolution de la potasse caustique (2 à 3 pour 100 de potasse du poids de la masse phosphorescente), et en mélangeant le tout, puis calcinant une seconde fois, j'ai obtenu une masse lumineuse bleue. Dans la première expérience la matière n'offrait cette teinte que dans certaines parties, dans la seconde elle avait partout cette couleur. Bien que la vivacité de la lumière émise ne soit pas aussi grande qu'antérieurement, je pense que la présence de la potasse facilite la formation de ce beau phosphore, si elle n'est pas toutefois nécessaire, et l'on peut expliquer alors pourquoi je l'avais obtenu accidentellement en calcinant des coquilles d'huîtres avec du persulfure de potassium. Mais, d'un autre côté, si l'on a égard aux changements que l'état moléculaire d'un corps peut apporter dans la couleur de la lumière émise, on ne peut affirmer qu'il ne serait pas possible d'obtenir cette même matière par d'autres moyens.

*Réduction du sulfate de chaux par le charbon.* L'action du charbon sur le sulfate de chaux à une température élevée donne, comme on le sait, des sulfures de calcium composés presque en totalité de monosulfure phosphorescent si la température est suffisamment élevée et prolongée; mais l'effet produit varie autant qu'en faisant usage des procédés de préparation décrits plus haut, et suivant l'origine du sulfate, ainsi que son état moléculaire, on peut avoir la plupart des nuances indiquées précédemment. Pour faire cette préparation, on mélange intimement du sulfate réduit en poudre très-ténue ou bien précipité, avec 17 p. 100 de noir de fumée, et on porte la température de la masse au rouge-blanc pendant une demi-heure; une durée beaucoup plus grande anéantirait tout pouvoir de phosphorescence dans la masse de sulfure. On a eu ainsi les résultats suivants :

| MODE DE PRÉPARATION DU SULFATE DE CHAUX MÉLANGÉ AU CHARBON. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE APRÈS L'INSOLATION. |
|---|---|
| Chaux ordinaire attaquée par l'acide sulfurique monohydraté; le résidu est lavé, puis desséché. | Jaune-orangé. |
| Chlorure de calcium cristallisé du commerce, et sulfate de soude; le précipité est desséché. | Jaune-orangé. |
| Nitrate de chaux, provenant de la chaux d'arragonite fibreuse et sulfate de soude. | Verdâtre faible, avec quelques points verts plus lumineux. |
| Sulfate de chaux cristallisé en petites aiguilles et provenant de la dissolution du bisulfate obtenu avec la chaux du commerce. | Violette. |
| Plâtre déshydraté ou hydraté. | Masse à peine lumineuse. |

Ainsi, par ce mode de préparation l'état moléculaire du sulfate a une influence aussi grande qu'en faisant usage du carbonate ou de la chaux attaqués l'un ou l'autre par le soufre.

On peut obtenir également du sulfure de calcium phosphorescent en employant des cristaux de gypse (cristaux en fer de lance, ou cristaux trapéziens, blancs ou colorés) brisés en fragments de 2 à 3 centimètres de longueur sur autant de largeur et de 2 à 3 millimètres

d'épaisseur. On place 20 à 25 grammes de ces fragments dans un creuset, on les entoure de charbon pulvérisé, puis on les soumet à la calcination au rouge-blanc pendant vingt minutes; on retire alors du creuset le sulfate transformé en partie en sulfure, et ce dernier conserve la texture du gypse et se détache par lamelles : ce sont ces lamelles que l'on soumet à l'action du rayonnement lumineux. On reconnaît ainsi qu'avec les différents gypses et même avec les diverses parties d'un même échantillon, en élevant la température au même degré et avec la même durée de l'action calorifique, les effets de phosphorescence produits ne sont pas uniformes. Les lamelles ne brillent souvent pas de la même teinte dans toute leur étendue : souvent on observe des teintes jaunâtres et verdâtres; d'autres fois bleuâtres et violettes, et j'ai même obtenu des teintes bleues très-tranchées (1). Je n'ai pu reconnaître exactement les conditions nécessaires pour avoir avec du sulfate de chaux cristallisé des nuances déterminées et uniformes; cependant, il m'a semblé que les teintes bleuâtres correspondaient à une moindre élévation de température et à une moindre durée de l'action calorifique. Quant aux teintes jaunes-orangées, on ne les a pas observées de cette manière, si ce n'est accidentellement.

*Phosphores préparés avec diverses coquilles.* Si l'on calcine simplement des coquilles d'huîtres dans un creuset porté à la température rouge-blanc pendant trois quarts d'heure environ, on trouve après le refroidissement que les coquilles sont phosphorescentes; elles doivent cette propriété à une petite quantité de sulfure de calcium provenant de la réduction du sulfate de chaux par le charbon, et qui se forme lors de la décomposition des matières organiques. Les teintes que l'on observe sont bleues-verdâtres claires, ou bien rouge-orangées; souvent une même coquille présente d'un côté cette dernière nuance et de l'autre la nuance verdâtre.

On peut se servir également de différentes coquilles telles que les pétuncles, les peignes, les porcelaines, etc., que l'on calcine séparément, comme les coquilles d'huîtres; on pulvérise la masse obtenue, et on la mélange avec moitié de son poids de soufre, comme on l'a fait avec différents précipités de carbonate de chaux, et l'on obtint alors, après la calcination, des masses lumineuses avec une couleur jaune plus ou moins orangée ou

(1) *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, t. 22, p. 247 (1848).

bien verte. En général les coquilles d'huîtres, les pétuncles, les hélices donnent de l'orangé; les porcelaines, les coquilles qui fournissent la nacre donnent des nuances vertes. On peut expliquer ce résultat en remarquant que les coquilles doivent renfermer des mélanges variables d'arragonite et de spath, et même que ces deux matières peuvent être dans des états physiques différents suivant la nature des coquilles.

Je dois signaler ici un résultat curieux, qui permet d'obtenir avec facilité le sulfure de calcium lumineux jaune ou orangé; il suffit, après avoir calciné les coquilles avec du soufre, d'avoir recours à une nouvelle calcination sans soufre, mais en ajoutant à la masse une très-petite quantité de peroxyde de manganèse (1 à 2 pour 100), pour augmenter beaucoup la vivacité de la lumière orangée ou jaune émise après l'insolation. Cette addition de peroxyde de manganèse peut même rendre lumineux jaunes des phosphores préparés avec la chaux ou avec des coquilles, et qui avaient d'autres nuances; cependant, pour la facilité des préparations du sulfure jaune ou orangé, il est préférable d'employer des coquilles, ou des parties de coquilles, qui lors de la première calcination sans soufre donnent déjà ces nuances après l'insolation. Quel est l'effet du peroxyde de manganèse? Agit-il comme agent d'oxydation ou par la nature de la base? C'est ce que je ne saurais indiquer, n'ayant pas poussé plus loin ces recherches.

Pour la préparation des sulfures de calcium lumineux vert, au lieu d'avoir recours aux précipités indiqués précédemment, on peut se servir de coquilles telles que les porcelaines et celles qui donnent la nacre, et après les avoir calcinées sans soufre, on les mélange avec une moitié de leur poids de cette matière, et on les calcine comme on l'a dit précédemment; mais il faut une certaine habitude de ces préparations pour atteindre la température nécessaire et ne dépasser ni le temps de la calcination ni le degré de température.

Lors de la préparation de plusieurs de ces sulfures, comme lors de celle du sulfure de strontium, dont il sera question plus loin, on obtient parfois des masses qui sont chimiquement impressionnables à la lumière, puisque l'action des rayons solaires fait changer légèrement la nuance de la couche superficielle de ces corps. Mais cet effet est indépendant du phénomène de phosphorescence que manifestent ces phosphores.

En somme, les préparations diverses de sulfure de calcium donnent le plus souvent des nuances jaunes-orangées ou vertes-bleuâtres; mais on

en peut produire d'autres en se plaçant dans les conditions spécifiées précédemment. Voici celles qui peuvent servir de type, et qui seront étudiées plus loin avec le spectre solaire :

| NUMÉROS D'ORDRE DES PRÉPARATIONS. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR LES SULFURES DE CALCIUM PAR PHOSPHORESCENCE. | MODE DE PRÉPARATION. |
|---|---|---|
| 1 | Rouge-orangée..... | Quelques parties provenant de coquilles d'huîtres calcinées simplement. |
| 2 | Jaune..... | Action du soufre sur le spath d'Islande. Action du peroxyde de manganèse sur des coquilles déjà calcinées avec du soufre (voir page 230). |
| 3 | Verte..... | Action du soufre sur l'arragonite (voir page 219). |
| 4 | Verte (lumière très-vive). | Action du soufre sur certains carbonates de chaux précipités (1). |
| 4 *bis*. | Verte..... ..... | Action du persulfure de potassium sur le carbonate de chaux et sur les coquilles calcinées; action du soufre sur le carbonate de chaux précipité du nitrate fait avec la chaux de craie et le carbonate d'ammoniaque (2). |
| 5 | Bleu indigo..... | Action du persulfure de potassium sur les coquilles d'huîtres et sur la chaux dans plusieurs circonstances; action du charbon sur quelques échantillons de gypse. |
| 6 | Violette..... | Action du soufre sur le carbonaté de chaux préparé par l'eau de chaux et l'acide carbonique (voir page 225). |

*Sulfures de strontium.*

Les sulfures de strontium lumineux peuvent être obtenus, comme ceux de calcium, soit : 1° par l'action directe du soufre sur l'oxyde et

(1) Le carbonate, qui donne de très-beaux effets, a été préparé avec le nitrate provenant de la chaux d'arragonite fibreuse ou avec la chaux des coquilles porcelaines, comme il a été dit plus haut.

(2) Les deux préparations indiquées pour le phosphore n° 4 *bis* ne donnent pas des masses aussi lumineuses l'une et l'autre : la première donne de très-belles nuances vertes ; la seconde une masse légèrement bleuâtre, d'une intensité beaucoup plus faible ; mais l'une et l'autre portées à 200° environ donnent temporairement une émission de lumière indigo, et se comportent, tant que cette température se maintient, comme le phosphore indiqué n° 5, et qu'il est difficile d'obtenir avec certitude.

sur les carbonates, oxalates, nitrates, acétates de strontiane, etc. ; 2° par celle des sulfures ; 3° par la réduction du sulfate de strontiane à l'aide du charbon. On trouve avec les composés de strontium les mêmes effets qu'avec ceux de calcium, si ce n'est que les nuances vertes et bleues sont plus fréquentes, et les nuances jaunes et rouges très-rares ; mais l'état moléculaire des matières sur lesquelles on fait réagir le soufre ou le charbon a une influence aussi grande sur l'effet produit que lorsqu'il s'agit de ces derniers composés.

En général avec ces corps il faut une moindre élévation de température pour obtenir des masses lumineuses qu'en se servant de composés à base de chaux ; d'un autre côté, une durée plus grande de l'action calorifique que celle qui est nécessaire pour la préparation de la substance phosphorescente ne détruit pas la phosphorescence, ainsi que cela se voit en opérant avec la chaux on le carbonate de chaux. C'est pour ce motif que ces phosphores sont préparés avec plus de certitude que ceux dont il a été question plus haut. Il est probable que si l'on opérait avec différents carbonates et sulfates de strontiane, on obtiendrait des différences du même ordre qu'avec ceux de chaux ; mais la plupart des composés de strontium dont j'ai fait usage ont été préparés à l'aide du sulfate de strontiane naturel provenant des terrains tertiaires.

J'indique ci-après les effets obtenus dans différentes réactions donnant du sulfure de strontium phosphorescent. La température rouge-blanc, donnée par un fourneau ordinaire de laboratoire alimenté avec du charbon de bois et ne dépassant par la fusion de l'or et de l'argent, est suffisante, ainsi qu'une durée de vingt minutes de l'action calorifique, on a fait réagir le soufre ou les sulfures sur la strontiane et sur le carbonate de strontiane, ou bien le charbon sur le sulfate de strontiane :

*Action du soufre sur la strontiane caustique pulvérisée* (50 *p.* 100 *de soufre*).

La strontiane, mélangée avec moitié de son poids de soufre, à une température inférieure à 500°, et maintenue seulement pendant un temps suffisant pour que l'excès de soufre soit chassé, donne une masse phosphorescente avec une teinte jaune légèrement rosée.

La même substance portée à la température rouge-blanc pendant vingt minutes, donne une matière phosphorescente violette avec une teinte très-vive.

*Action du soufre sur le carbonate de strontiane* (33 p. 100 *de soufre*).

Le carbonate de strontiane obtenu par une dissolution de strontiane dans l'eau et un courant de gaz acide carbonique calciné avec du soufre donne une masse phosphorescente avec une teinte verte-jaunâtre au centre et avec une nuance bleue-claire dans les parties touchant au creuset.

Ce mélange calciné en couche mince dans un large têt donne une phosphorescence bleue-claire avec une teinte très-belle.

Le carbonate obtenu par le chlorure de strontium et les carbonates d'ammoniaque ou de soude (bi-carbonate ou sous-carbonate) à 100°, ainsi que le carbonate obtenu par le nitrate de strontiane et le carbonate d'ammoniaque à 100 degrés, calcinés avec le soufre, donnent des masses qui sont phosphorescentes avec des teintes verdâtres au centre et bleuâtres contre les bords du creuset.

Le carbonate obtenu par le nitrate de strontiane et les carbonates de soude (sous-carbonate ou bi-carbonate) à 100 degrés donne un phosphore qui est lumineux avec une teinte verte très-vive.

Le carbonate obtenu par l'acétate et les carbonates de soude (sous-carbonate ou bi-carbonate) à 100 degrés, donne un phosphore aussi lumineux et de même couleur que le précédent.

*Action du soufre sur divers composés.*

L'oxalate de strontiane préparé par le nitrate et l'oxalate de potasse calciné avec le soufre donne une phosphorescence bleuâtre.

L'acétate de strontiane dans les mêmes conditions donne une matière phosphorescente avec une teinte verte jaunâtre.

Le résidu de la réaction du soufre et du nitrate de strontiane étant calciné de nouveau présente une phosphorescence verte très-brillante.

*Action du sulfure d'antimoine sur la strontiane anhydre.*

Le maximum d'effet est obtenu avec quatre parties de strontiane pulvérisée et une partie de sulfure d'antimoine : la phosphorescence produite est rouge brique, mais la lumière émise est très-faible.

*Réduction du sulfate de strontiane par le noir de fumée* (13 p. 100).

Des cristaux de sulfate de strontiane bacillaire, ou en table, calcinés au milieu du charbon ont produit une matière lumineuse bleu clair.

Le sulfate provenant de la réaction de l'acide sulfurique monohydraté sur la strontiane, calciné avec du charbon, a présenté une masse phosphorescente verdâtre au centre et légèrement jaunâtre près des bords du creuset.

Le sulfate de strontiane obtenu par le nitrate de strontiane et le sulfate de soude a donné dans les mêmes conditions une phosphorescence verte légèrement bleuâtre.

On reconnaît, d'après ces résultats, qu'avec la strontiane anhydre la température a une influence sur la préparation, puisque au-dessous de 500 degrés la masse présente une lumière, jaune, et au-dessus du rouge une teinte violette d'une grande pureté, et cela quelle que soit la durée de l'action calorifique. Ce phosphore éprouve quelquefois un changement de nuance quand on l'expose à la lumière, et devient un peu rosé; c'est une action chimique indépendante du phénomène lumineux, comme on l'a déjà dit plus haut à propos du sulfure de calcium.

Avec le soufre et le carbonate de strontiane ( préparé au moyen de l'acétate ou du nitrate de strontiane et du carbonate de soude), on a une masse lumineuse verte très-remarquable, et qui est le plus beau phosphore que l'on puisse obtenir avec les composés de strontium. Ce phosphore présente quelquefois une particularité assez curieuse; si la durée de la préparation n'est que de vingt minutes environ et ne dépasse pas le degré indiqué plus haut, la masse a une couleur propre légèrement jaune soufre; en même temps, comme on le verra dans un des chapitres suivant, elle est vivement lumineuse dans la partie ultra-violette du spectre avec une nuance semblable. Si l'on prolonge beaucoup la calcination, et que la température soit très-élevée, la couleur propre de la matière vue au jour diminue de plus en plus, et elle tend à devenir blanche sans que la lumière émise par phosphorescence change de teinte; cette dernière diminue seulement d'intensité. Souvent, pour avoir ce beau phosphore très-lumineux il faut calciner une deuxième fois et même une troisième fois la matière après l'avoir pulvérisée, mais sans ajouter de soufre; par ce moyen on a même une plus grande homogénéité dans la teinte de la lumière émise par phosphorescence.

Ce phosphore ne présente pas toujours la particularité d'avoir une couleur jaune-verdâtre quand on le regarde à la lumière du jour, et on verra que dans cette circonstance il émet simultanément des rayons de même nuance, mais de durée bien inégale; cependant, même quand il n'offre pas ces effets il peut être aussi lumineux dans l'obscurité après

l'action du rayonnement. Bien que je n'aie pu me rendre compte des conditions nécessaires pour que ce beau phosphore soit toujours doué de cette proprieté et reconnaître si elle n'est pas due à l'action d'une matière étrangère, cependant j'ai remarqué que lorsque le carbonate de strontiane est obtenu à l'aide de la réaction exercée entre le nitrate de strontiane et le carbonate de soude à la température de 15 à 20°, si l'élévation de température lors de l'action du soufre n'est pas trop forte, on peut obtenir ce résultat d'une manière plus ou moins tranchée.

L'action de l'air extérieur modifie le sulfure de strontium phosphorescent au moment de sa préparation et lui donne une teinte bleu clair, comme lorsqu'on calcine des sulfates naturels avec le charbon; ainsi, en plaçant certains carbonates indiqués plus haut dans un large têt, la masse offre la propriété dont il s'agit. Il se produit peut-être dans ce cas une autre combinaison que le monosulfure de strontium.

L'action des sulfures tels qu'un courant d'hydrogène sulfuré ou de vapeur de sulfure de carbone sur la strontiane et sur le carbonate, ainsi que celle des sulfures de potassium, de cuivre, de zinc, etc., donne lieu à des masses lumineuses jaunâtres et verdâtres qui n'ont rien de particulier et n'offrent pas beaucoup de régularité; le sulfure d'antimoine donne lieu, au contraire, à un phosphore lumineux rouge brique, qui est dû probablement à un antimonio-sulfure obtenu dans les conditions indiquées plus haut.

Une observation assez intéressante à faire quand on étudie l'action des sulfures de strontium, c'est que, préparés de manière à ce qu'ils donnent leur maximum de lumière, il semble que la couleur propre de la substance phosphorescente vue par diffusion à la lumière du jour soit analogue ou rappelle, quoique à un faible degré, la lueur qu'elle émet par phosphorescence ou par vibrations propres à l'obscurité, après l'action préalable de la lumière solaire ou diffuse. Quoique ce rapprochement ne puisse être fait qu'avec les composés phosphorescents du strontium, et qu'on n'observe qu'accidentellement quelques résultats analogues avec les composés du barium et du calcium, cependant il est à signaler, car il semble indiquer une disposition des molécules à produire un effet lumineux déterminé soit par diffusion, soit par phosphorescence ou vibrations propres.

En résumé, les principales préparations de sulfures de strontium servant de type sont les suivantes :

| *Préparations.* | *Phosphorescence.* | *Teinte propre de la matière.* |
|---|---|---|
| N° 1. | Rouge-orangé. | Rouge brique. |
| N° 2. | Jaune légèrement rosé. | Brune. |
| N° 3. | Verte-jaunâtre. | Jaune soufre. |
| N° 4. | Bleu clair. | Blanche. |
| N° 5. | Bleu clair. | Blanche. |
| N° 6. | Violette. | Légèrement violacée. |

La préparation n° 1 résulte de l'action du sulfure d'antimoine sur la strontiane anhydre.

La préparation n° 2 est faite au moyen de la réaction exercée entre le soufre et la strontiane caustique au-dessous de 500°, en agissant pendant peu de temps.

La préparation n° 3 résulte de l'action du soufre sur certains composés de strontium, voir page 234, ou bien de la réduction par le noir de fumée du sulfate de strontiane précipité.

La préparation n° 4 provient de l'action du soufre sur le carbonate de strontiane dans un large têt (voir pag. 235).

La préparation n° 5 est due à la réduction par le charbon des cristaux de sulfate de strontiane naturelle.

La préparation n° 6 résulte de l'action du soufre sur la strontiane anhydre au-dessus de 500°.

Les préparations 3 et 6 sont les plus belles.

*Sulfures de barium.*

Les sulfures de barium présentent dans certains cas, comme les sulfures de calcium et de strontium, des phénomènes de phosphorescence très-remarquables. Cependant, pour obtenir des masses bien lumineuses il faut en général une température plus élevée et plus soutenue que pour les autres sulfures ; tel est l'effet produit lors de la réduction du sulfate de baryte naturel par le charbon, c'est-à-dire lors de la réaction qui donne lieu au phosphore anciennement connu sous le nom de *phosphore de Bologne;* d'un autre côté, toutes les masses obtenues ne sont pas lumineuses, comme lorsqu'il s'agit des sulfures de strontium.

Les différents composés du barium proviennent en général de la réduction du sulfate de baryte naturel par le charbon, puis ensuite de la décomposition du sulfure obtenu. Toutes les préparations que j'ai pu faire ne m'ont donné que des teintes variables du rouge orangé au

vert, et aucune nuance bleue et violette comme avec la strontiane et la chaux. La température du fourneau alimenté au charbon de bois est suffisante, surtout pour la réaction exercée entre le soufre et des carbonates, et le temps de l'action calorifique doit varier entre trente et quarante-cinq minutes pour avoir le maximum d'effet. Voici quels sont les principaux effets qui ont été observés :

*Action du soufre sur la baryte caustique ou délitée* (31,5 p. 100).

La phosphorescence de la matière est jaune.

*Action du soufre sur le carbonate de baryte préparé comme il est indiqué ci-après* (25 p. 100 *de soufre*).

Le carbonate de baryte obtenu par l'eau de baryte et l'acide carbonique calciné avec le soufre donne une matière lumineuse avec une teinte jaune d'or ; certaines parties contre le creuset sont orangées.

Le carbonate étant obtenu au moyen de l'acétate de baryte et du bi-carbonate de soude à 100 degrés présente dans les mêmes circonstances une masse phosphorescente jaune d'or à la partie centrale et orangée contre les parois du creuset ; la lumière émise est très-vive.

Le même corps calciné avec le soufre dans un large têt a offert une phosphorescence rouge-orangée.

Le carbonate formé par l'acétate de baryte et le carbonate d'ammoniaque à 100 degrés donne une phosphorescence jaune-orangée. La matière est moins lumineuse que les deux précédentes.

Le carbonate préparé avec le nitrate de baryte et le bi-carbonate de soude à 100 degrés donne une phosphorescence jaune avec quelques parties jaunes-verdâtres.

Le carbonate préparé avec le chlorure de barium et le bi-carbonate de soude à 100 degrés présente une phosphorescence verte-jaunâtre très-vive.

Le carbonate étant formé avec le chlorure de barium et le carbonate d'ammoniaque à 100 degrés, la phosphorescence est verte-jaunâtre, plus jaunâtre qu'avec la préparation précédente.

*Action du soufre sur l'oxalate et sur l'acétate de baryte.*

La matière est phosphorescente jaune avec une lumière peu intense.

*Produit de la réaction à la température rouge de l'azotate de baryte et du soufre.*

La matière est phosphorescente jaune orangé avec quelques parties plus rougeâtres.

*Calcination du sulfure de barium cristallisé.*

La matière après une première calcination présente des nuances diverses jaunes, orangées et vertes; après une deuxième calcination, la matière est phosphorescente, jaune d'or.

*Réduction du sulfate de baryte par le charbon* (10 *à* 15 *pour* 100 *de noir de fumée*) (1).

Le sulfate naturel, soit cristallisé, soit bacillaire, calciné avec le noir de fumée a donné une phosphorescence jaune-orangée avec des parties rouges-orangées.

Le sulfate de baryte préparé au moyen de la baryte caustique et de l'acide sulfurique monohydraté, puis lavé et desséché, a présenté dans les mêmes conditions une phosphorescence verte-jaunâtre faible.

Le sulfate de baryte obtenu avec le chlorure de barium et le sulfate de soude a donné une phosphorescence verte-jaunâtre, mais de faible intensité.

L'hyposulfate de baryte dans les mêmes conditions a donné une matière faiblement lumineuse verte-jaunâtre.

On reconnaît encore ici l'influence de l'état moléculaire du composé métallique sur la couleur de la phosphorescence, mais peut-être avec moins de netteté qu'avec les composés de calcium ; car les teintes de la lumière émise sont moins variables. Cependant, on peut voir que le chlorure donne un carbonate qui permet d'obtenir un phosphore lumineux vert, tandis que le nitrate et l'acétate ne présentent que les nuances jaunes et orangées. Il est à noter que les chlorures de calcium et de strontium tendent à donner des teintes bleuâtres et violettes, tandis que celui de barium permet d'obtenir une couleur verte; d'un autre côté les nitrates et acétates de baryte ont donné des carbonates qui conduisent à des masses phosphorescentes de sulfures de barium jaunes et orangées, tandis que les combinaisons analogues de calcium et de strontium donnent des masses phosphorescentes vertes très-lumineuses.

Pour obtenir aisément le sulfure de barium lumineux orangé, un des

(1) Pour obtenir le phosphore de Bologne, au lieu d'employer la méthode de préparation du sulfure de barium appelée méthode de Margraff (voir livre 1er, page 18), j'ai préféré faire usage de celle qui consiste à mélanger du noir de fumée et du sulfate de baryte, laquelle m'a donné de meilleurs résultats.

moyens les plus simples consiste à mélanger intimement avec du sulfate de baryte naturel en masses cristallines, préalablement pulvérisé, 12 à 15 p. 100 de noir de fumée, et à ajouter un peu d'alcool pour rendre le mélange plus intime. Quand la masse est desséchée, on la calcine au rouge dans un creuset pendant quarante-cinq à soixante minutes, à une température qui ne doit pas dépasser le cerise clair ou la fusion de l'argent. Ensuite, on broie de nouveau la masse et on la calcine sans rien ajouter. On doit agir sur 100 à 150 gr. de matière. Quand la masse retirée du creuset a une teinte propre légèrement rougeâtre, c'est un indice que la calcination a été trop longue et l'opération est manquée. En opérant simultanément sur plusieurs creusets, que l'on retire successivement, on peut arriver à obtenir le résultat que l'on désire, car on ne peut prévoir la durée nécessaire à l'opération, ce temps dépendant de l'élévation de température donnée par le fourneau. Mais d'après ce mode de préparation, que la température soit plus ou moins élevée, la lumière émise après une calcination suffisante est toujours de même nuance, quoique plus ou moins vive.

L'influence de l'air à une température élevée se fait également sentir sur le sulfure de barium comme sur les sulfures de strontium et de calcium, et dans ce cas la masse donne lieu après l'insolation à une émission de lumière d'une teinte orangée plus rouge que celle obtenue sans l'intervention de l'air; tel est l'effet que l'on obtient en calcinant les matières dans un large têt.

On a fait agir sur la baryte, sur le carbonate et sur différents composés du barium, l'hydrogène sulfuré, la vapeur de sulfure de carbone et divers sulfures, et l'on n'a obtenu que des masses inégalement lumineuses jaunâtres et verdâtres et peu homogènes; je n'ai donc pas cru devoir rapporter ici les résultats des expériences.

En somme, les préparations suivantes peuvent servir de types dans l'étude de l'action de la lumière sur les sulfures de barium, et surtout les n$^{os}$ 2 et 4, qui offrent une émission de lumière d'une grande vivacité dans les premiers instants qui suivent l'action lumineuse :

| *Préparation.* | *Phosphorescence.* |
|---|---|
| N° 1. | Rouge-orangée. |
| N° 2. | Jaune d'or. |
| N° 3. | Jaune. |
| N° 4. | Vert légèrement jaunâtre. |

La préparation n° 1 provient de l'action du soufre sur le carbonate de baryte obtenu par l'eau de baryte et l'acide carbonique, ainsi que de quelques parties provenant de la réduction par le charbon du sulfate de baryte cristallisé.

La préparation n° 2 résulte de la réaction du soufre et du carbonate de baryte obtenu par l'acétate et le bi-carbonate de soude, ainsi que de la réduction par le charbon du sulfate de baryte cristallisé.

La préparation n° 3 résulte de l'action du soufre sur la baryte.

La préparation n° 4 est obtenue par le chlorure de barium et le carbonate de soude ou d'ammoniaque.

Ces différents phosphores sont tous très-beaux.

Lorsqu'on a préparé des sulfures phosphorescents, ils conservent la faculté d'être impressionnés par le rayonnement tant qu'ils ne sont pas altérés; mais si on les abandonne à l'air humide, ils ne tardent pas à perdre peu à peu toute leur action. Pour les conserver intacts, il suffit de les enfermer dans des tubes de verre scellés à la lampe; j'en ai qui n'ont pas perdu leur impressionnabilité depuis seize ans, et on a vu dans le livre I, page 28, que j'avais un échantillon provenant de Canton et qui avait plus d'un siècle.

Lorsque les substances préparées sortent du creuset avec une certaine compacité, comme lorsqu'il s'agit des préparations de sulfure de strontium et de barium, il y a avantage à laisser la matière concassée en fragments dans l'intérieur des tubes et non pas à la broyer, car la cassure naturelle donne toujours une surface plus brillante que les cassures que fait naître la pulvérisation; mais dans le dernier cas, quoique la lumière émise soit moins vive, sa teinte est la même qu'avec les fragments.

On doit faire remarquer encore que les phosphores renfermés dans les tubes émettant toujours de la lumière, même quand les tubes sont vides, il est évident que c'est en vertu d'une action physique et non pas d'une combustion lente des corps que cet effet se produit.

### *Sulfure de zinc* (*blende hexagonale*).

La blende naturelle est phosphorescente, mais pas, à beaucoup près, à un degré aussi élevé que le sulfure de zinc obtenu par volatilisation à très-haute température par M. Sidot (1). Dans cet état, le sulfure de

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. 62 et t. 63, p. 142 et 188.

zinc au lieu d'être sous forme des cristaux dérivant du système cubique, comme la blende ordinaire, se présente en longs prismes hexagonaux ; de là le nom de blende hexagonale qu'on lui a donné.

Pour obtenir des cristaux de cette matière il faut la volatiliser dans un courant d'acide sulfureux ou d'hydrogène sulfuré ; ceux qui jouissent de la propriété de phosphorescence au plus haut degré sont préparés de préférence, d'après M. Sidot, dans un courant d'acide sulfureux. On place dans un tube en porcelaine des cristaux de sulfure de zinc soit de blende naturelle, soit ceux que l'on obtient par la calcination préalable du sulfure amorphe, et l'on élève très-fortement la température jusqu'au rouge pendant quatre à cinq heures en faisant passer pendant ce temps du gaz acide sulfureux dans le tube. Au bout de deux heures de la plus haute température du fourneau, les cristaux commencent à paraître dans la partie du tube en porcelaine qui est au dehors, et qui se trouve plus froide, et y grandissent assez pour en occuper tout le diamètre.

La matière forme ainsi une réunion de cristaux qui, vus au jour, sont parfois tout à fait blancs et limpides, et d'autres fois à la partie centrale de ces masses sont jaunes-verdâtres. Cette teinte rappelle celle des composés d'uranium, et est semblable à celle du sulfure de strontium lumineux vert dont on a parlé plus haut; elle est probablement due, comme dans ce dernier corps, à un état moléculaire particulier, car les cristaux qui la présentent sont très-phosphorescents. Cependant, il y a des cristaux blancs qui donnent dans l'obscurité une émission de lumière aussi vive et aussi persistante. Ainsi, de même que pour le sulfure de strontium, on n'a pas trouvé jusqu'ici quelles sont les conditions nécessaires pour reproduire à volonté cette teinte particulière.

La blende hexagonale, blanche ou jaune, qui est bien lumineuse dans l'obscurité, donne une lumière verte qui rappelle tout à fait celle du sulfure de strontium vert; l'intensité lumineuse après l'exposition à la lumière est peu différente qu'avec ce dernier corps, mais paraît diminuer un peu moins rapidement. On doit remarquer que la partie centrale de ces agglomérations de cristaux est souvent seule lumineuse par ce mode d'investigation; les parties environnantes qui ont été en contact avec le tube en porcelaine le sont moins ou même ne le sont pas du tout; on verra plus tard qu'ils peuvent cependant présenter une phosphorescence de courte durée par d'autres moyens d'expérience.

Cette matière phosphorescente est très-intéressante et peut servir à des expériences sur l'action du spectre, car elle est inaltérable aux

agents atmosphériques, et sous ce rapport elle est plus facile à garder que les sulfures alcalino-terreux, qui ne conservent leurs propriétés qu'à l'abri de l'humidité et de l'action de l'acide carbonique. Elle est seulement d'une préparation plus laborieuse, et n'a donné qu'une phosphorescence persistante d'une seule nuance.

Je me borne à la description des méthodes de préparation des sulfures précédents comme se rapportant aux phosphores artificiels les plus brillants et les plus intéressants à étudier. Il y a bien d'autres matières qui présentent des effets analogues, mais qui ne peuvent approcher de ceux dont il a été question ; tels sont les corps cités dans le 1er paragraphe de ce chapitre.

J'ai préparé des sulfures d'aluminium, de magnésium et des métaux alcalins sans pouvoir obtenir jusqu'ici avec ces composés des masses phosphorescentes.

Le sélénium étant l'analogue du soufre, j'ai pu, en faisant réagir directement ce métalloïde sur la strontiane, obtenir un séléniure lumineux avec une belle teinte verte analogue à celle que donne le sulfure obtenu au moyen du carbonate de la même base. Si l'on pouvait disposer d'une certaine quantité de sélénium, on obtiendrait sans doute des matières phosphorescentes analogues aux sulfures alcalino-terreux.

Les cyanures des métaux alcalino-terreux sont également phosphorescents, mais à un moindre degré que les sulfures. Si l'on mélange, par exemple, à une dissolution de nitrate de chaux une solution de cyanure simple de potassium, on obtient un précipité qui, lavé et desséché, est phosphorescent par insolation avec une teinte légèrement verdâtre. Ces composés permettent de montrer, comme les sulfures, que leur arrangement moléculaire exerce une grande influence sur les résultats observés : en effet, si l'on prépare directement du nitrate de chaux avec un poids déterminé de spath d'islande, puis avec la même quantité d'arragonite, en précipitant les deux dissolutions par du cyanure de potassium et en faisant dessécher les précipités, celui qui est obtenu avec l'arragonite est beaucoup plus lumineux que l'autre, quoique la teinte de la lumière émise paraisse peu différente.

D'après les détails dans lesquels je suis entré, il me paraît probable que plusieurs des différences observées dans la manière dont les substances phosphorescentes se comportent par rapport au rayonnement lumineux tiennent dans certains cas à la composition chimique des matières, dans d'autres à leur état moléculaire, puisque dans les mêmes

circonstances de production de ces corps et à égalité de température, suivant que l'on a fait usage d'un chlorure ou d'un nitrate, ou bien suivant l'origine primitive de la chaux, ainsi qu'on l'a dit à propos des sulfures de calcium, les effets varient. Il est vrai que dans quelques cas des combinaisons différentes peuvent se produire, et alors elles luisent d'une manière particulière, comme je l'ai signalé précédemment; mais dans d'autres, comme lorsqu'on opère avec les carbonates de chaux ou lorsque l'on réduit en sulfures les sulfates des métaux alcalino-terreux, je ne pense pas que cet effet ait lieu. On doit remarquer que les matières phosphorescentes formées sont presque toujours des mélanges; mais comme ce sont les sulfures des métaux dont j'ai parlé qui présentent les effets lumineux par phosphorescence au plus haut degré, et que la préparation de ces matières doit être faite par la voie sèche, on est forcé d'avoir recours à ce mode de préparation : d'un autre côté, je me suis assuré que des mélanges de corps étrangers et de matières colorantes ne changent pas la couleur de la lumière émise par un corps après l'insolation.

Quand on voit des minéraux tels que le diamant et le spath fluor présenter des différences très-grandes dans l'intensité comme dans la couleur de la lumière émise, et cela probablement en vertu d'états moléculaires différents, on est porté à croire que les mêmes causes peuvent amener les mêmes effets quand il s'agit de substances qui, bien que d'une composition très-complexe, sont si éminemment impressionnables. Quelle est la cause de cette différence? tient-elle à la disposition des molécules, à leur distance? Il est impossible de répondre actuellement à cette question : on peut dire seulement, d'après les observations faites sur le carbonate de chaux, que la cause en vertu de laquelle les corps émettent des lumières différentes, c'est-à-dire en vertu de laquelle les molécules peuvent vibrer différemment, après l'action préalable de la lumière, paraît être autre que celle d'où dépend, dans un même corps, l'état cristallin différent.

# CHAPITRE II.

## Durée et intensité de la lumière émise.

---

### § 1er. *Durée de la lumière émise par les différents corps phosphorescents à longue persistance.*

On a dit précédemment que le temps pendant lequel les matières phosphorescentes émettaient de la lumière dans l'obscurité était très-variable, et dépendait de la sensibilité des matières et de leur température. La plupart des minéraux et des substances salines lumineuses ne jouissent pas de la faculté de luire pendant plus de quelques secondes, ou, au maximum, de quelques minutes après l'action solaire à la température ordinaire; et encore faut-il que l'observateur soit resté dans l'obscurité pendant quinze à vingt minutes avant d'étudier les substances impressionnables, afin que sa rétine soit plus apte à saisir les moindres traces de lumière.

Il n'y a aucun rapport entre la durée de l'effet lumineux et l'intensité de la lumière émise à chaque instant : ainsi certains minéraux, comme l'arragonite, donnent une émission de lumière verdâtre assez vive, mais qui ne dépasse guère quinze à vingt secondes ; la leucophane, la chlorophane et certains diamants au contraire, qui après l'insolation sont moins lumineux que cette substance, offrent une durée qui est telle, qu'après une heure ils émettent encore de la lumière. Du reste, les expériences dont on va indiquer les résultats, ainsi que celles qui seront faites avec le phosphoroscope, conduisent à la même conclusion.

On a choisi parmi les sulfures phosphorescents ceux qui présentaient les teintes les plus vives et l'intensité lumineuse la plus grande après l'action du rayonnement; on les a impressionnés en les exposant à la lumière solaire pendant une ou deux secondes, puis on les a rentrés dans l'intérieur d'une chambre parfaitement obscure, afin de suivre le décroissement de leur intensité lumineuse. En outre, ces matières ont été placées dans une boîte dont on n'ôtait le couvercle

qu'au moment de l'observation, afin de les soustraire le plus possible à l'influence de la lumière extérieure qui aurait pénétré dans la chambre noire. On a suivi d'abord ces phosphores pendant une heure, puis ensuite on est revenu dans la chambre noire vingt minutes avant chaque observation, afin que les yeux fussent plus impressionnables aux faibles rayons émanés des matières phosphorescentes.

Les résultats suivants ont été obtenus en comparant les intensités lumineuses des différentes matières phosphorescentes renfermées dans des tubes de verre, et, autant que l'on a pu en juger à la vue simple, par la comparaison des effets produits dans différents tubes. On indique ci-après les matières sur lesquelles on a opéré, ainsi que la couleur de la lumière émise immédiatement après l'action solaire, et l'ordre d'intensité de la lumière émise après cette insolation : le n° 1 indique la substance la plus lumineuse, le n° 2 celle qui l'est un peu moins, etc. On a eu :

| | | |
|---|---|---|
| Sulfure de calcium vert (préparation n° 4, page 231).. | lumière verte-bleuâtre. | n° 1. |
| Sulfure de strontium vert (préparation n° 3, page 236).. | lumière verte..... | n° 1. |
| Sulfure de barium vert (préparation n° 4, page 239).. | lumière verte-jaunâtre. | n° 2. |
| Sulfure de barium (préparation n° 2, page 239)..... | lumière jaune-orangée. | n° 3. |
| Sulfure de strontium violet (préparation, n° page 236).. | lumière violette-indigo. | n° 4. |
| Sulfure de strontium jaune (préparation, n° page 236)... | lumière jaune..... | n° 4. |
| Sulfure de calcium (préparation n° 1, page 231)..... | lumière rouge-orangée. | n° 5. |
| Sulfure de calcium (préparation n° 6, page 231)..... | lumière violette..... | n° 5. |

Ainsi, immédiatement après l'influence solaire les deux premiers phosphores sont aussi lumineux l'un que l'autre et plus que tous les autres; puis viennent successivement les autres préparations.

Trois minutes après l'ordre n'est pas changé, mais la dernière préparation donne une lumière à peine appréciable.

Dix minutes après le commencement de l'expérience les deux premiers phosphores sont encore également lumineux, le troisième l'est un peu moins. Tous les autres, sauf le dernier, viennent ensuite, et présentent à peu près la même intensité, sans que la couleur de la lumière émise soit distincte; le dernier n'est plus visible.

Vingt minutes après, le sulfure de barium jaune-orangé et le sulfure de calcium rouge-orangé sont très-faibles, et à peine visibles une heure ensuite ; l'on a alors :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sulfure de calcium vert, | après 1 h. | (n° 1), | après 2 h. | (n° 1), | après 3 h. | (n° 1). |
| Sulfure de strontium vert, | id. | (n° 1), | id. | (n° 1), | id. | (n° 1). |
| Sulfure de barium vert, | id. | (n° 2), | id. | (n° 2), | id. | (n° 2). |
| Sulfure de strontium violet, | id. | (n° 3), | id. | à peine visible, | id. | insensible. |
| Sulfure de strontium jaune, | id. | (n° 3), | id. | (n° 3), | id. | (n° 3). |

après cinq heures, sept heures, vingt heures et trente heures, on n'a plus que quatre phosphores visibles; on a :

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sulfure de calcium vert, | après 5 h. | (n° 1), | après 7 h. | (n° 1), | après 20 h. | (n° 1), | après 30 h. | (n° 1). |
| Sulfure de strontium vert, | id. | (n° 1), | id. | (n° 1), | id. | (n° 1), | id. | (n° 1). |
| Sulfure de barium vert, | id. | (n° 2), | id. | (n° 2), | id. | insensible, | id. | » |
| Sulfure de strontium jaune, | id. | (n° 2), | id. | (n° 2), | id. | (n° 2), | après 30 h. | à peine visible. |

Après dix minutes d'action, les différences de teinte de ces divers phosphores qui sont si brillants immédiatement après l'action solaire sont difficiles à distinguer; après vingt minutes elles sont impossibles à saisir.

Ces résultats mettent en évidence plusieurs faits curieux : on reconnaît que trois des sulfures sont encore visibles après trente heures dans l'obscurité, ce qui dénote une émission très-lente de lumière; mais le sulfure de strontium jaune, qui immédiatement après l'action solaire était peu phosphorescent et ne se trouvait qu'au quatrième rang, a conservé après trente heures une action sensible, tandis que le sulfure de barium jaune était éteint après une heure, et le sulfure vert de la même base, qui luit si vivement dans les premiers instants, n'offrait plus aucune action après vingt heures. Quant au sulfure de calcium rouge, il ne donnait plus aucune phosphorescence après une heure, et le phosphore violet, quoique lumineux à peu près de même intensité que le sulfure jaune de strontium, ne luisait plus après dix minutes, tandis que ce dernier était encore lumineux après trente heures.

On voit que l'intensité primitive de la phosphorescence n'est pas en rapport avec la durée de l'émission lumineuse, et que des corps qui sont peu phosphorescents peuvent continuer à luire pendant longtemps. Ces dernières substances, qui sont dans le même cas que la chlorophane et le diamant, ont une grande capacité pour la phosphorescence, si l'on peut s'exprimer ainsi, c'est-à-dire une élasticité plus grande par rapport aux vibrations lumineuses.

Les résultats précédents ont été obtenus à la température de 16 degrés. Il faut avoir soin, pendant l'expérience, de laisser les corps à la même température, car en les échauffant, après avoir été insolés, ils deviennent très-lumineux, mais ils cessent rapidement de l'être; en effet, ils ne sont capables que d'émettre des rayons correspondant à une certaine somme de vibrations lumineuses, qui est la même pour un même corps, comme on l'a expliqué dans le livre III, page 52.

### § 2. *Durée de la persistance de l'impression lumineuse sur les corps; phosphoroscope.*

On a pu voir, d'après les effets dont il a été question jusqu'ici, que ce n'est que dans les cas très-particuliers où les corps présentent une persistance assez grande dans l'impression exercée sur eux par la lumière que les phénomènes de phosphorescence peuvent être observés. Ce n'est qu'après être arrivé à la construction d'un appareil que j'ai nommé *phosphoroscope* que j'ai pu reconnaître, non-seulement que le phénomène de phosphorescence était beaucoup plus général qu'on ne le pensait, mais encore à préciser les conditions dans lesquelles il se produit. Dans cet appareil en effet les corps sont vus par l'observateur après l'action de la lumière, de façon que le temps qui sépare le moment de l'observation de celui de l'action lumineuse est aussi court que l'on veut, et peut être mesuré; en outre, les effets lumineux sont rendus continus.

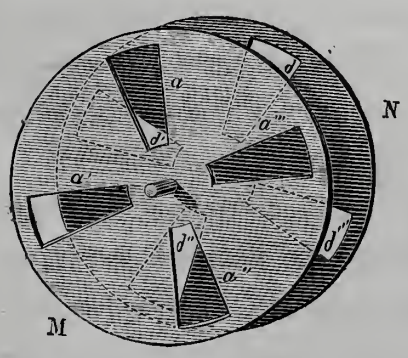


Fig. 29.

Cet appareil est fondé sur le principe suivant : Qu'on imagine au milieu d'une chambre noire deux disques verticaux M et N, fig. 29, fixés d'une manière permanente à un axe horizontal, à peu de distance l'un de l'autre (1 centimètre environ), et pouvant recevoir un mouvement de rotation autour de cet axe. Supposons que le premier disque M porte quatre ouvertures $a$, $a'$, $a''$, $a'''$, de 22° 30′ de grandeur angulaire et placées symétriquement autour du centre, et que le second disque N porte également quatre ouvertures semblables $b$, $b'$, $b''$, $b'''$, mais ne correspondant pas aux quatre précédentes, de sorte que chaque espace vide $a$, $a'$, $a''$, $a'''$, soit en regard d'un espace plein du second disque, et *vice versa*. Si l'on dirige d'une

manière fixe un faisceau de rayons solaires sur le disque antérieur M, perpendiculairement à ce disque et près de la circonférence, ce faisceau ne pénétrera de l'autre côté que si l'une des ouvertures $a$, $a'$, $a''$, $a'''$, se trouve dans la direction de ce faisceau; mais dans ce cas il sera arrêté par l'autre disque. En donnant donc un mouvement de rotation au système des deux disques autour de leur axe commun, jamais le faisceau lumineux ne pourra le traverser, car il faudrait arriver à une vitesse telle que la lumière pût passer d'un disque à un autre pendant la durée de la rotation de la moitié d'un intervalle plein, ce qui, avec la vitesse connue de la lumière, ne serait atteint que par un mouvement de rotation de plus de deux milliards de tours par seconde; or, on ne peut guère dans ces appareils aller au delà d'une vitesse de quatre à cinq cents tours par seconde. Ainsi, ce système des deux disques M et N, interposé entre un observateur et le volet d'une chambre noire par où arrive le faisceau lumineux sur le disque antérieur, fera l'effet d'un écran opaque dans toute son étendue.

Mais si entre les deux disques on place un corps dans une position fixe et dans la direction du faisceau lumineux, ce corps pourra recevoir de la lumière chaque fois que, par le mouvement de rotation, une ouverture du premier disque M passera entre lui et la source lumineuse. Si alors ce corps devient actif et émet, après l'insolation, des rayons en vertu de son action propre, si en outre cette émission présente une certaine durée, l'observateur placé de l'autre côté, au delà de N, verra le corps chaque fois qu'une ouverture de ce second disque N passera entre lui et le corps. Il faut, bien entendu, que le mouvement de rotation soit tel que la durée de l'émission lumineuse du corps en vertu de son action propre soit plus grande que celle du passage de la moitié d'un espace plein des disques devant l'observateur.

L'appareil suivant réalise cette disposition, et permet de voir les corps d'une manière continue après l'impression de la lumière et en vertu de leur action propre, en éliminant toute trace de lumière incidente, même quand la durée de l'impression de la lumière n'est que de $\frac{1}{5000}$ de seconde.

MN, fig. 30, est une boîte cylindrique de 10 centimètres de diamètre environ, fixée sur un montant en fonte et pouvant se placer dans une position quelconque. Cette boîte renferme un système de deux disques mobiles percés d'ouvertures, et analogue à celui qui vient d'être dé-

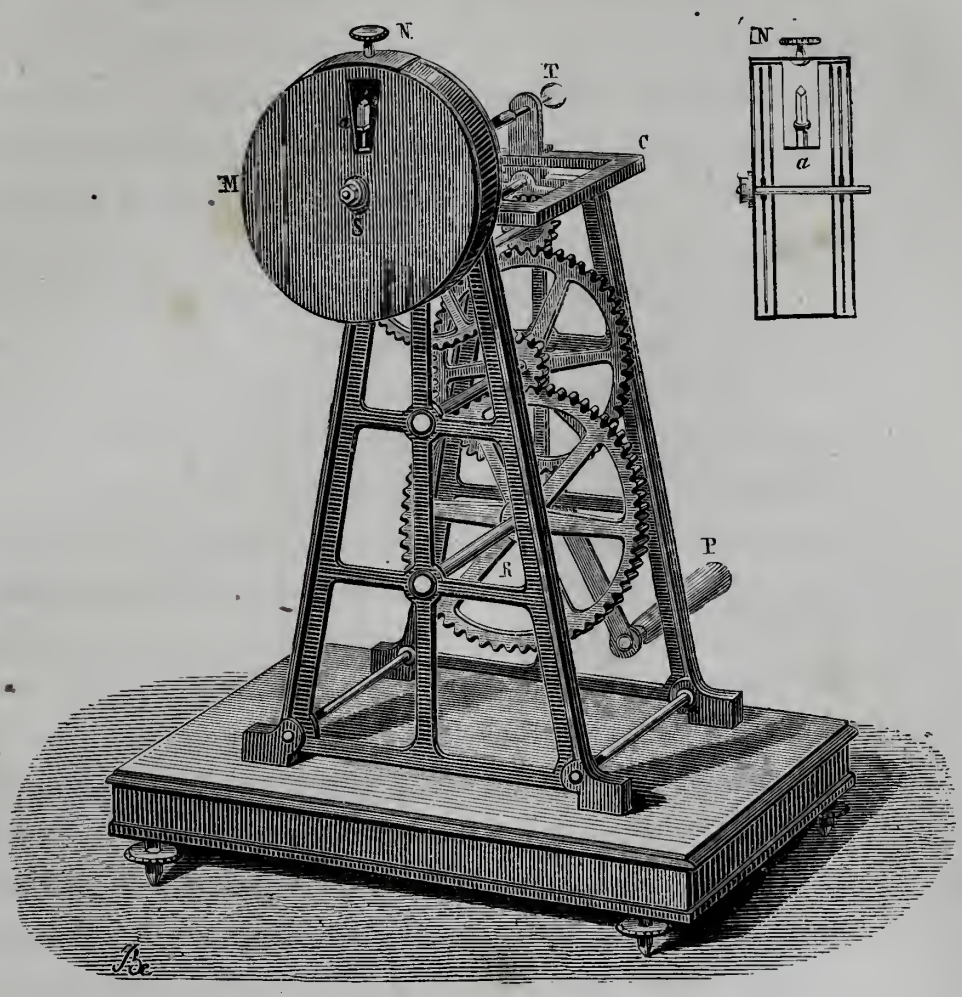



Fig. 30.

crit plus haut fig. 29. Cette boîte a ses faces à double fond, comme l'indique la coupe de la boîte figurée à côté de l'appareil, de sorte que chacun des disques peut se mouvoir entre deux plaques métalliques en passant très-près de leur surface. Les faces de cette boîte, à l'intérieur comme à l'extérieur, sont percées d'ouvertures qui se correspondent exactement et qui ont même grandeur angulaire que les ouvertures des disques mobiles intérieurs. Si donc ces disques mobiles n'existaient pas, la lumière venant à tomber sur la partie antérieure de MN traverserait la boîte de part en part; mais du moment que les disques mobiles se trouvent dans l'intérieur, la lumière incidente ne peut plus passer, et l'appareil fonctionne pour permettre l'observation des effets de phosphorescence comme cela a été dit plus haut.

Les deux disques mobiles reçoivent leur mouvement dans la boîte fixe MN, à l'aide d'un axe ST. Cet axe, au moyen d'engrenages, est mis en rotation à l'aide d'une manivelle P, ou bien d'un ressort, ou encore d'un tambour monté sur l'axe de la grande roue R et autour duquel

s'enroule une corde tirée par un poids. Dans l'appareil dont j'ai fait le plus souvent usage, quand le grand axe fait un tour, l'axe du dernier mobile fait 143 révolutions. On ne peut, du reste, avec la manivelle P faire au delà de 3 à 4 tours par seconde; par conséquent les disques mobiles ne peuvent guère exécuter au delà de quatre à cinq cents révolutions par seconde.

Le corps *a*, qui doit recevoir l'action de la lumière, est placé dans un étrier qui s'adapte à la partie supérieure de la boîte MN, et au moyen duquel il se trouve interposé entre les deux disques. On pourrait également le fixer sur une tige passant à frottement au travers d'une plaque adaptée sur le côté de la boîte à l'aide d'un bouton.

Afin que lors du mouvement des disques mobiles il n'y ait aucune trace de lumière diffuse qui vienne entraver la marche des observations, il est nécessaire que la dimension angulaire des parties pleines de ces disques soit égale à trois fois celle des parties vides; d'après cela, les ouvertures doivent être en nombre pair. Les appareils dont les disques mobiles ont 4 ouvertures de 22° 30′ sont ceux qui m'ont donné les meilleurs résultats, surtout pour les expériences dont il sera question plus loin. On a construit des appareils du même genre avec des ouvertures différentes de grandeur, soit pour les expériences de démonstration dans les cours publics, soit en vue d'effets spéciaux produits sur différentes classes de substances (1).

Une étude attentive de l'emploi du phosphoroscope m'a montré que lorsque l'axe de cet appareil est en mouvement le corps impressionnable placé au milieu n'est éclairé par la lumière incidente que pendant une série d'intervalles de temps très-courts dont la mesure est la durée du passage d'une ouverture des disques mobiles : d'après la largeur angulaire des ouvertures de l'appareil décrit plus haut (22° 30′, les intervalles pleins ayant 67 30′), quand le grand axe fait un tour en une seconde la roue des disques en faisant 143, le temps du passage d'une ouverture est de $\frac{1}{143 \times 16} = \frac{1}{2288}$ ou de 0″,00044.

Ainsi, suivant la vitesse du phosphoroscope, le corps reçoit une série d'éclairements successifs pendant des temps très-courts et bien déterminés. Le temps qui sépare le moment où l'insolation cesse de l'instant où l'observateur voit le corps au milieu de l'ouverture, et que je

(1) *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 62, p. 8 et suivantes.

nommerai *temps moyen,* est représenté par la vitesse d'un point parcourant un arc égal à la moitié d'un espace obscur ou de 33° 43′; il est donc les $\frac{3}{2}$ de la fraction indiquée plus haut, c'est-à-dire que pour une seconde du temps de la rotation du grand axe ce temps moyen est de 0″,00066.

Quand un corps devient visible dans le phosphoroscope, l'observateur reçoit donc l'impression lumineuse qui s'est conservée après ce dernier temps, et cela en totalité pendant les passages de chaque ouverture ; ces passages étant successifs, l'effet lumineux est rendu continu. Mais si avec une vitesse déterminée V du grand axe de l'appareil on voit le corps lumineux et que l'on mesure l'intensité de la lumière donnée par ce corps, cette intensité peut être considérée comme représentant celle de la lumière émise après une insolation qui a duré $\frac{V''}{2288}$ et alors que le corps est vu, en moyenne, $\frac{V''}{1530}$ après cette insolation.

On suppose, bien entendu, que la durée du passage d'une ouverture suffit pour insoler le corps : cela est vrai pour un certain nombre de substances, quand l'intensité de la lumière excitatrice est suffisante; pour d'autres, comme on le verra plus loin, et notamment pour les corps qui conservent pendant assez longtemps l'impression de la lumière, et que l'on a nommés phosphores artificiels, une seule insolation ne donne pas le maximum d'effet, surtout avec une faible intensité lumineuse excitatrice; mais le passage successif des ouvertures conduit au même résultat, et donne au corps le maximum d'effet qu'il peut recevoir, et qui est atteint au bout d'un temps assez court. C'est pour ce motif qu'avec ces derniers corps, sauf des exceptions dont il sera question plus loin, les intensités lumineuses sont indépendantes de la vitesse de rotation du phosphoroscope entre les limites où j'ai opéré. Afin de diminuer le temps nécessaire pour que le corps ait le maximum d'effet et soit inférieur à la durée de passage d'une ouverture du disque mobile de l'appareil devant l'observateur, il faut donc augmenter le plus possible l'intensité de la lumière incidente, c'est-à-dire concentrer cette lumière avec une lentille.

On voit en résumé, d'après ce qui précède, que si un très-grand nombre de corps deviennent lumineux dans l'appareil, l'effet produit sur un observateur est continu, car l'impression que ces corps reçoivent de la part du rayonnement se reproduit périodiquement chaque

fois qu'une ouverture du disque antérieur mobile passe devant eux. Il résulte également de là que pour une vitesse de rotation uniforme l'intensité de la lumière émise reste la même si celle de la lumière incidente ne change pas, et que cette intensité dépend de la vitesse de rotation elle-même. Il faut encore remarquer, et j'insiste sur ce point, que l'intensité de la lumière émise augmente avec la vitesse de rotation jusqu'à une certaine limite, différente pour chaque corps, et atteint un maximum que l'on ne peut dépasser, quelle que soit ultérieurement la vitesse de l'appareil; ce dernier effet provient de ce que si le temps qui sépare le moment de l'insolation de l'instant de la vision devient de plus en plus court, le temps pendant lequel le corps est éclairé diminue dans le même rapport, et lorsque le corps reçoit de la part de la lumière incidente autant qu'il perd pendant qu'il n'est plus soumis à son action, le maximum est atteint.

On peut aisément, à l'aide de différents corps, donner des exemples des effets précédents, c'est-à-dire de l'intensité lumineuse constante avec une vitesse de rotation constante du phosphoroscope, de l'augmentation de cette intensité quand on fait tourner l'appareil plus rapidement, et de l'établissement du maximum d'action.

Le spath d'Islande excité par la lumière solaire blanche ou par la lumière électrique devient lumineux orangé avec une vitesse très-petite de l'appareil; puis le maximum de lumière est atteint très-vite. En effet, le corps une fois insolé n'émet plus de lumière d'une manière appréciable un tiers de seconde après avoir été soumis à l'action de la lumière. Parmi les variétés de spath d'Islande les plus lumineuses, on peut citer les spaths équiaxes et surtout les variétés prismatiques.

Le verre ordinaire crown ou flint placé dans les mêmes conditions donne une lumière verdâtre plus ou moins vive : le maximum est atteint avec une vitesse un peu plus grande qu'en employant le spath d'Islande, car ce n'est qu'après un vingtième de seconde environ que les rayons émis ne sont plus appréciables.

L'alumine (coryndon ou alumine calcinée) présente une lumière d'un beau rouge; après un vingtième de seconde les rayons émis ne sont plus perceptibles. Les rubis sont les variétés de coryndon qui présentent les effets les plus énergiques.

L'azotate d'urane donne une lumière verte qui devient très-vive quand on tourne très-rapidement l'appareil, car ce n'est que lorsqu'il se passe plus d'un centième de seconde entre le moment où l'insolation cesse et

l'instant de la vision, que les rayons émis par le corps ne peuvent plus être perçus par l'observateur.

Du reste, plusieurs platino-cyanures ne donnent plus d'effets appréciables après $\frac{1}{3000}$ ou $\frac{1}{4000}$ de seconde, et le bisulfate de quinine présente une limite encore plus reculée. On ne fait que citer ici plusieurs exemples, car un grand nombre de corps seront étudiés plus loin en détail.

Ainsi le phosphoroscope résout le problème de faire voir un corps au moyen de la lumière émise en vertu de son action propre et après l'influence du rayonnement, et non pas en vertu des rayons diffusés de la lumière incidente; il tamise pour ainsi dire la lumière qu'un corps peut émettre, quand ce corps reçoit un faisceau lumineux sur sa surface. Cet effet est produit en raison de ce que l'émission lumineuse, par action propre des corps, offre une certaine durée.

Dans l'appareil qui a été décrit plus haut, le corps est vu par transparence du côté opposé à celui par lequel la lumière incidente vient le frapper; quand le corps a une petite épaisseur cela est indifférent, même quand il est presque opaque. Il est facile de comprendre qu'à l'aide d'un semblable principe on a pu construire des appareils de diverses formes et même dans lesquels le corps est du côté par lequel la lumière extérieure vient l'influencer (1).

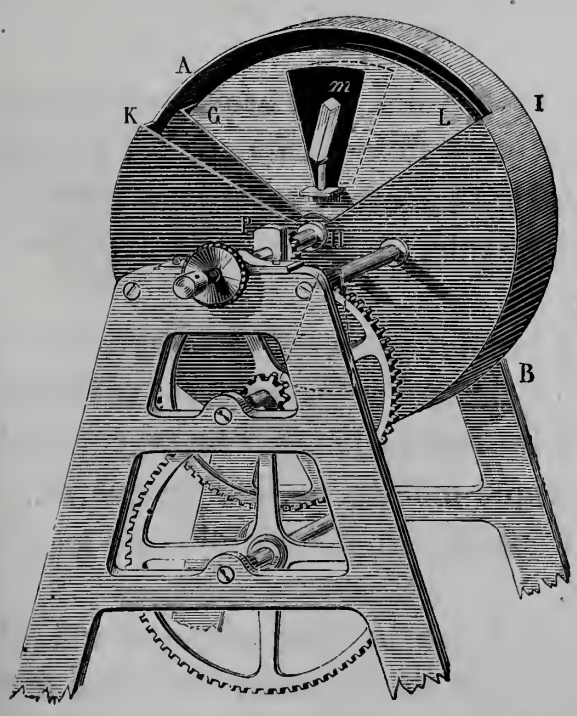


Fig. 31.

Je citerai encore un phosphoroscope qui présente assez de différence avec les précédents pour qu'il soit nécessaire d'indiquer comment il est construit : La fig. 31 représente la partie supérieure de l'instrument, la partie inférieure comprenant les rouages disposés à peu près de la même manière que dans l'appareil décrit plus haut.

Le disque mobile placé du côté de la lumière incidente, n'a qu'une seule ouverture de 30°, au lieu de quatre ouvertures comme précédemment; dans la figure

(1) Voir à ce sujet *Annales de physique et de chimie,* 3e série, t. 55, p. 80, et t. 57 et 62.

elle est représentée en pointillé à la base de la boîte, en face des rouages. Le disque situé du côté de l'observateur, en avant de la figure, a une ouverture C de 120°, mais sur le bord il est soudé à une partie cylindrique laquelle, dans son mouvement de rotation, passe près du fond de la boîte et empêche que le corps *m*, éclairé par les rayons actifs, ne soit vu dans la chambre noire au moment de l'influence de la lumière.

D'après cette disposition, la boîte AB, essentiellement fixe, est formée du côté opposé à l'observateur par deux plaques circulaires de 12 centimètres de diamètre, entre lesquelles peut se mouvoir le disque mobile. Un tube en cuivre, soudé à cette boîte, et qui n'est pas représenté ici, sert à éliminer les rayons de lumière diffuse dont il est nécessaire de se garantir. Deux ouvertures angulaires de 30° chacune sont pratiquées en face du tube et du corps *m*, de façon à permettre à la lumière d'impressionner le corps à un moment donné. Ce corps, du reste, se trouve soutenu par un petit support fixé dans l'intérieur de la boîte. La boîte AB est ouverte à sa partie supérieure ; le disque fixe qui est tourné du côté de l'observateur ayant une ouverture KHI représentant un angle au centre de 120°, et la partie cylindrique qui enveloppe la boîte étant également coupée dans toute l'étendue comprise dans cet espace, le corps *m* se trouve donc à découvert au moment où il brille en vertu de son action propre, et on peut l'observer en avant et dans différentes directions autour de lui.

Quand l'appareil est en rotation, l'intervalle vide provenant de l'ouverture faite dans la partie mobile pourrait occasionner un déplacement de l'axe de rotation ; il est facile de s'opposer à cet effet à l'aide d'un contre-poids P, d'une épaisseur suffisante, dont on règle les dimensions par des essais préliminaires.

La disposition de cet appareil ne permet pas à l'observateur, avec la même vitesse de l'axe, de percevoir les impressions lumineuses dans les mêmes conditions qu'avec les appareils précédents, car il n'y a qu'une seule ouverture dans le disque mobile, au lieu de quatre, et il est nécessaire que la vitesse de rotation soit quatre fois plus grande qu'avec l'appareil décrit plus haut.

Il est facile d'évaluer au reste quel est le temps moyen qui sépare l'instant de l'insolation du moment de la vision du corps dans ce phosphoroscope : comme l'axe du dernier mobile fait 180 tours quand la manivelle en fait 1, le temps du passage d'une ouverture est de

$$V.\frac{1}{180}.\frac{30}{360}=\frac{V}{2160};$$

ce corps est donc vu après l'insolation au bout d'un temps moyen mesuré par

$$V.\frac{1}{180}.\frac{165}{360}=V.\,0'',002546$$

V étant la vitesse de rotation du grand axe.

Ce phosphoroscope, mettant le corps à découvert au moment où celui-ci est lumineux par lui-même, permet à un certain nombre de personnes placées autour de l'appareil d'être témoins des effets. Un modèle de ce genre se trouve dans les galeries du Conservatoire impérial des arts et métiers.

J'ai fait construire un appareil analogue à celui qui est représenté fig. 30, p. 249, mais dont les ouvertures très-étroites des disques mobiles, ainsi que celles de la boîte, n'ont que 2°, et les espaces pleins 7° ; il y a donc 40 ouvertures dans chaque disque. La vitesse du grand axe étant représentée par V, le temps du passage d'une ouverture est

$$V.\frac{1}{143}.\frac{2}{360}=V.\frac{1}{25740};$$

quant au corps placé entre les deux disques, il n'est vu après l'insolation qu'au bout d'un temps moyen représenté par

$$V.\frac{1}{143}.\frac{3,5}{360}=V.\frac{1}{14710}.$$

Comme on peut facilement faire exécuter à la manivelle deux et trois tours par seconde, on voit que le temps qui sépare l'insolation de la vision pourrait être de $\frac{1}{30000}$ à $\frac{1}{40000}$ de seconde ou de 25 à 30 millionièmes de seconde. Mais je n'ai pas trouvé que cet appareil pût être employé aussi avantageusement que les précédents. Il est vrai qu'on arrive, avec une faible vitesse du grand axe, à avoir le maximum d'intensité lumineuse que peuvent présenter la plupart des corps impressionnables, mais on n'augmente pas le nombre des substances que l'on peut observer avec les autres instruments; on est obligé de leur donner

une dimension en largeur très-étroite, et ensuite pour pouvoir concentrer une assez grande quantité de lumière sur leur surface il aurait été nécessaire d'avoir une lentille à plus court foyer que celle dont j'ai fait usage et une autre disposition de la boîte fixée à la chambre noire où les expériences ont été faites; aussi ai-je préféré l'emploi du premier phosphoroscope representé fig. 30, page 249.

Je me suis également servi d'un appareil formé d'un cylindre vertical de 5 centimètres de hauteur sur 3 centimètres de diamètre, mobile autour de son axe et placé concentriquement dans un cylindre fixe, de façon à ce que une distance très-petite les sépare l'un de l'autre; ce cylindre mobile intérieur peut d'ailleurs recevoir sur sa surface une bande de papier enduit de matières impressionnables.

Dans le cylindre extérieur fixe, constituant une sorte d'enveloppe, se trouvent deux ouvertures de 1 centimètre de largeur sur 3 de hauteur, l'une du côté de la lumière incidente, l'autre dans la chambre noire et tournée vers l'observateur. Du reste, un large écran percé à son centre d'une ouverture, est fixé au cylindre, de sorte que la matière impressionnable adhérente à la bande de papier qui entoure le cylindre mobile ne peut recevoir de lumière que par l'ouverture opposée. Un fort mouvement d'horlogerie met en rotation le cylindre avec une vitesse qui peut être modifiée à l'aide d'un régulateur dont on incline plus ou moins les ailettes.

Au moyen de cette disposition, la lumière incidente ne peut traverser le système des cylindres concentriques; mais en donnant un mouvement de rotation au cylindre intérieur, à partir d'une certaine vitesse, la persistance des impressions lumineuses sur les matières placées sur le papier fixé à la surface de ce cylindre permet à l'observateur de recevoir une impression lumineuse qui est d'autant plus vive que la vitesse de rotation est plus grande.

On verra, par la suite, dans quelles circonstances chacun des appareils précédents a été employé.

### § 3. *Substances impressionnables diverses, visibles dans le phosphoroscope.*

Si l'on s'en tient à une faible émission de lumière, un très-grand nombre de corps deviennent lumineux dans le phosphoroscope quand ils sont éclairés fortement par la lumière solaire ou électrique concentrée avec une lentille. Non-seulement les matières phosphorescentes

dont on a parlé dans les deux premiers chapitres de ce livre donnent lieu à une émission de lumière, mais encore beaucoup d'autres composés. Parmi les corps simples, indépendamment du carbone à l'état de diamant, on peut citer le soufre comme donnant un effet assez faible; la lueur que le phosphore émet quand il est dans l'air, ne m'a pas permis de reconnaître s'il était lumineux par insolation ; du reste, en tous cas, l'effet produit ne pourrait être que très-faible, car cette lueur ne paraît pas augmenter quand le corps est dans le phosphoroscope. Les métaux n'ont présenté jusqu'ici aucune action appréciable.

Les bases alcalines et alcalino-terreuses ainsi que les terres et plusieurs de leurs combinaisons, sont les corps qui offrent en général les actions les plus vives. La potasse, la soude, ainsi que les chlorures, bromures, iodures de potassium et de sodium, et les sulfates, silicates, etc., de potasse et de soude donnent des effets marqués ; quant aux bases alcalino-terreuses et à leurs combinaisons, elles présentent des effets parfois très-intenses. On peut citer, indépendamment des chlorures, nitrates, sulfates de chaux, de baryte et de strontiane, ceux qui renferment un acide organique comme les tartrates, formiates, citrates, ou bien les corps à base de cyanogène, etc. L'oxamate de baryte donne une teinte blanche-verdâtre, et dans les rayons ultra-violets une émission lumineuse assez vive de même nuance. La mellite donne également une teinte verte assez brillante.

La magnésie, le carbonate et le sulfate de la même base, le carbonate de glucine, le zircon, donnent dans le phosphoroscope une émission de lumière.

Parmi les corps dont l'action est des plus vives, on peut citer l'alumine ainsi que plusieurs de ses combinaisons. Cette matière est d'autant plus intéressante à examiner qu'on peut l'obtenir amorphe, cristallisée, puis combinée de manière à jouer le rôle d'acide ou de base; plus loin les effets auxquels elle donne lieu seront étudiés en détail.

Quant à la silice, elle ne manifeste aucune action, à moins qu'elle ne soit à l'état de quartz résinite, et il est possible qu'en raison de cela un très-grand nombre de minéraux dans la composition desquels elle entre ne possèdent aucun pouvoir lumineux appréciable par les moyens mis en usage jusqu'ici. D'un autre côté, dans ses combinaisons elle laisse prédominer l'effet des bases qui se trouvent combinées avec elle. Il est très-remarquable de voir que des deux substances solides les plus répandues à la surface de la terre, l'alumine et la silice, l'une

offre une action très-énergique, l'autre ne présente d'effets que dans des circonstances spéciales.

Les substances organiques et les composés à base organique sont pour ainsi dire presque tous lumineux, quoique les effets qu'ils présentent soient de faible intensité; cependant, la durée de la persistance des impressions lumineuses est assez étendue : on peut citer parmi ces matières les alcalis végétaux, les substances comme le sucre, la mannite, la salicine, l'asparagine, la dulcine, l'orcine, etc., les acides tartrique, citrique, benzoïque, stéarique, succinique, etc. Néanmoins, avec quelques groupes de ces corps on observe une disposition moléculaire spéciale d'après laquelle il y a persistance très-courte de l'effet lumineux et non appréciable au phosphoroscope dont je me suis servi : tels sont le bisulfate et le bitartrate de quinine, la dissolution végétale de chlorophylle, d'esculine, quelques platino-cyanures, etc.

Les sels métalliques sont en général très-peu actifs, et quand ils le sont, l'effet qu'ils manifestent est très-faible. Je citerai néanmoins parmi ceux qui donnent une émission de lumière, indépendamment du sulfure de zinc (blende-hexagonale) dont il a été question précédemment, page 270, l'acide arsénieux, le nitrate d'argent, les sulfate et acétate de cadmium, le nitrate de plomb, le cyanoferrure de potassium, etc. Quant aux composés d'uranium, ils donnent lieu à des effets d'une grande intensité, mais de courte durée, dont il sera question dans un des paragraphes suivants.

Il faut observer que l'émission de lumière dans l'appareil est nécessairement limitée à la sensibilité de la rétine, à l'intensité des rayons actifs et à une certaine durée de persistance de l'impression lumineuse. Cette durée ne peut être représentée par un temps déterminé que relativement aux effets appréciables à nos yeux, car les corps, même quand ils ne sont pas visibles, pourraient continuer cependant après l'action lumineuse à émettre des rayons qui ne seraient plus sensibles; dans ce cas, en augmentant l'intensité des rayons actifs on augmenterait la durée de la persistance ainsi que l'intensité des effets, et il est probable que l'on augmenterait la liste des matières lumineuses après l'action du rayonnement. De même, on peut supposer que certaines matières qui ne commencent à apparaitre qu'avec une vitesse de rotation assez grande du phosphoroscope deviendraient visibles en faisant usage d'un appareil dont les disques tourneraient plus rapidement encore.

D'un autre côté, même si les corps ne sont pas lumineux dans le phosphoroscope, on ne peut dire qu'il n'existe aucun effet après l'action du rayonnement; car la lumière pourrait exciter des vibrations d'une autre vitesse que celles qui sont perceptibles à nos yeux (et en général plus lentes), et capables de donner lieu soit à des effets de chaleur, soit à d'autres actions moléculaires encore inconnues.

L'influence de l'état moléculaire de chaque corps sur les effets produits est quelquefois plus grande que celle qui provient de leur nature; les observations faites à l'aide des sulfures alcalino-terreux, et rapportées dans les deux premiers chapitres, avaient déjà conduit à cette conclusion; cependant, on ne peut formuler aucune loi générale à cet égard.

D'abord, en ce qui concerne la fusion, j'ai déjà signalé les effets observés avec le chlorure de calcium et avec le nitrate de chaux fondus ou avant la fusion. D'autres substances montrent que tantôt l'effet lumineux est augmenté, tantôt il est diminué, tantôt enfin il n'est pas changé. L'acide borique en paillettes est assez vivement lumineux avec une teinte bleue-verdâtre; si on fond cette substance une fois revenue à la température ordinaire, elle est jaune dans le phosphoroscope avec une intensité presque aussi grande, mais la composition de la lumière émise est différente. Le sulfate neutre de quinine donne une teinte jaune faible quand il est en petits cristaux; lorsque cette substance est ondue, elle donne une masse un peu brune et très-lumineuse avec une teinte jaune. Le borax, le phosphate acide de chaux sont dans le même cas : cristallisés, ils sont faiblement lumineux; fondus, ils offrent une lumière jaunâtre qui est très-vive, surtout avec le second corps. Le sucre blanc en grains cristallins est faiblement lumineux avec une teinte verdâtre; fondu, l'émission lumineuse est plus vive, et sa teinte devient jaunâtre. Quant à l'alumine, comme on le verra plus loin, amorphe ou cristallisée elle donne lieu aux mêmes effets.

L'acide arsénieux se présente sous deux états moléculaires différents : vitreux ou opaque. En prenant des fragments d'un même morceau, j'ai trouvé sensiblement le même effet pour les deux états de ce même corps. Du reste, dans le cours de ce travail on verra comment l'état moléculaire de chaque corps peut modifier les effets observés.

Dans certains cas les effets de phosphorescence par insolation sont analogues à ceux que l'on peut obtenir par élévation de température par frottement ou par percussion, mais dans d'autres il en sont tout

à fait indépendants. On a déjà parlé de ce résultat page 37. On peut à cette occasion citer le fluorure de calcium, qui après avoir été porté préalablement à la température rouge perd la propriété de donner une émission de lumière par la chaleur, en conservant le pouvoir d'être impressionné par le rayonnement solaire; d'un autre côté, si la dolomie et la chaux phosphatée donnent des lueurs analogues par le frottement et dans le phosphoroscope, le quartz, qui est très-lumineux par percussion, ou bien quand on le frotte, ne donne en général aucune émission lumineuse sous l'influence de la lumière quand il est bien transparent.

§ 4. *Intensité maximum de la lumière émise par un corps pour une intensité lumineuse incidente déterminée.*

Lorsqu'un corps impressionnable est soumis à l'action de la lumière, il devient actif et rayonne comme il le fait au moment où on le rentre subitement dans l'obscurité; seulement, l'intensité de la lumière émise étant toujours une fraction très-petite de celle de la lumière incidente, il est difficile sous l'influence de celle-ci, sauf dans des cas spéciaux, de distinguer l'effet dû au rayonnement émané du corps de celui qui résulte de la réflexion régulière ou irrégulière de la lumière.

Il est évident que l'intensité de la lumière que le corps peut émettre en vertu de son action propre augmente graduellement depuis le moment où la lumière vient le frapper pendant un temps qui doit être très-court, et atteint un maximum qui ne peut être dépassé pour une intensité déterminée. Ce maximum est atteint lorsque la vitesse avec laquelle le corps reçoit l'impression lumineuse est la même que celle avec laquelle il la perd par rayonnement. On ne connaît pas *à priori* la loi qui règle cette illumination du corps ainsi que celle de la déperdition de la lumière, de sorte que l'on ne peut déterminer ce temps; mais on démontre aisément par expérience l'établissement d'un maximum d'action. S'il s'agit des sulfures alcalino-terreux, il suffit d'introduire un faisceau de rayons solaires dans une chambre noire et de projeter ce faisceau sur un fragment d'un corps phosphorescent; on reconnaît alors qu'après une action plus ou moins longue le fragment présente dans les différents cas la même intensité lumineuse à l'instant où l'on cesse de l'éclairer.

L'emploi du phosphoroscope conduit également à l'observation d'un maximum lumineux; pour cela, l'on place dans l'appareil à quatre ou-

vertures décrit plus haut, page 248, et représenté fig. 30, un fragment d'un corps comme le spath d'Islande, l'aluminate de magnésie, l'alumine, le verre ordinaire, l'azotate d'urane, etc., et l'on dirige sur ce fragment le tube latéral CD du photomètre décrit antérieurement page 74, fig. 3, afin de comparer l'intensité de la lumière émise à celle de la lampe vue au moyen de l'autre tube AB du photomètre. On fixe devant l'objectif de ce dernier un verre coloré convenablement choisi, pour que les deux images à comparer aient la même teinte.

Si l'on met alors le phosphoroscope en rotation, en augmentant graduellement la vitesse de cet appareil, on reconnaît que l'intensité lumineuse avec le spath d'Islande reste la même, quelle que soit la vitesse de rotation ; cependant en employant le phosphoroscope à une ouverture, si l'on tourne très-lentement le grand axe, l'intensité lumineuse est moindre. Cet effet montre néanmoins que dans le premier appareil au delà d'une certaine limite, relativement assez petite, l'intensité lumineuse n'augmente plus avec la vitesse de rotation.

Ce même apareil à quatre ouvertures, qui a servi aux recherches, dont il va être question, montre que l'intensité lumineuse du verre ordinaire augmente jusqu'à la vitesse de 1 tour du grand axe en 5 secondes, ou bien jusqu'à une persistance de $\frac{5}{1530}$ ou o'', 0033; avec une vitesse plus grande, c'est-à-dire pour une limite de persistance moindre, quelle que soit la vitesse de rotation du phosphoroscope, l'intensité de la lumière émise reste la même.

L'alumine présente le même effet que le spath d'Islande, mais en tournant plus rapidement le grand axe du phosphoroscope. Le verre d'urane et l'azotate d'urane donnent également un maximum, mais qui n'est atteint qu'à une limite dix fois plus reculée qu'avec l'alumine. Le maximum paraît donc être atteint avec une vitesse d'autant moindre que les corps présentent une plus grande persistance des impressions lumineuses, et surtout pour ces derniers corps avec une vitesse d'autant plus petite que l'intensité de la lumière émise est plus faible. Ainsi, chaque corps présente un effet maximum dans le phosphoroscope, mais à partir d'une vitesse déterminée, qui est différente pour chacun d'eux et qui dépend de l'intensité lumineuse active ; ce maximum est donc relatif au corps, à l'intensité lumineuse active et à l'appareil employé.

Quand on opère avec le spath d'Islande ou mieux avec la chaux carbonatée prismatique, qui est très-brillante, ou bien avec l'aluminate de

magnésie ou une substance qui offre une persistance assez grande, il semble qu'en tournant très-lentement la roue du phosphoroscope la substance paraisse plus brillante que lorsqu'on augmente la vitesse de rotation. En examinant le spath d'Islande orangé avec le photomètre, la différence n'est plus appréciable, et si l'intensité lumineuse paraît plus forte dans les premiers instants, cela ne peut être que d'une quantité qu'il n'est pas possible de mesurer; il est probable que cet effet provient d'une illusion due à ce que le phosphoroscope en tournant lentement ne laisse voir la matière que par intermittences, et de ce que cette succession d'éclats et d'intervalles obscurs fait paraître celle-ci plus lumineuse qu'au moment où l'impression devient continue.

On vient de dire que le maximum est atteint avec une vitesse d'autant moindre que la persistance de l'action de la lumière sur le corps est plus grande ; cependant il y a des exceptions, dont il est facile de distinguer la cause : la chaux fluatée, le diamant, le sulfure de strontium lumineux vert, et d'autres corps, sont dans ce cas ; ils offrent une persistance de longue durée, et ils augmentent d'intensité lumineuse avec la vitesse de l'appareil. Mais aussi ils présentent une émission de rayons de diverse réfrangibilité ayant des persistances inégales, et la plupart changent de couleur dans le phosphoroscope, comme on le verra dans le chapitre IV; la chaux fluatée (chlorophane verte) d'abord bleue passe à l'orangé, puis au vert, à mesure que la vitesse augmente; le diamant est jaune pour une faible vitesse, puis bleu avec une vitesse plus grande. Quant au sulfure de strontium vert (1), il n'offre point de changement de couleur, mais il présente cet exemple singulier d'un corps donnant lieu à une émission de différents rayons de même teinte, mais de durée inégale. Avec ces corps, le maximum n'est atteint dans le phosphoroscope qu'avec une vitesse assez grande et quand on a dépassé la limite qui va être indiquée plus loin, et qui est relative aux rayons émis dont la durée est la moindre.

Il semble donc, quand l'émission lumineuse des corps est de longue durée et qu'ils ne changent pas de nuance dans le phosphoroscope quelle que soit la vitesse de celui-ci, que ces corps soient dans des conditions régulières et ne donnent pas de rayons de même réfrangibilité et d'inégale persistance; quand le contraire a lieu, comme on le verra plus loin, la loi d'émission n'est plus la même.

(1) Voir *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LV, p. 65 et 116.

L'intensité maximum observée dans le phosphoroscope peut être expliquée de la manière suivante : Le temps au bout duquel le corps placé dans le phosphoroscope acquiert son action maximum dépend non-seulement de l'intensité de la lumière incidente, mais encore de sa capacité pour recevoir l'impression lumineuse et de son pouvoir absorbant. Si le corps n'offre qu'une persistance de peu de durée, le temps nécessaire pour l'impressionner sera aussi très-court, comme on l'expliquera dans le paragraphe suivant; quand on mettra en rotation le phosphoroscope, ce corps sera donc éclairé pendant un temps plus long que celui qui est nécessaire pour avoir le maximum d'effet, et l'intensité de la lumière reçue par l'observateur augmentera graduellement avec la vitesse de rotation de l'appareil, car l'image apparaîtra de façon que le temps qui sépare le moment de l'insolation de l'instant de la vision deviendra de plus en plus court. Mais au delà d'une certaine limite, qui est atteinte très-promptement avec les corps qui offrent une persistance assez longue, si le temps qui sépare le moment de l'insolation de celui de la vision devient plus petit, le temps de l'insolation diminue dans le même rapport; au moment du passage d'une ouverture du disque tourné du côté de la lumière incidente le corps n'a pas perdu tout l'effet produit par l'illumination précédente, et reçoit à ce nouveau passage une nouvelle impression ; ainsi donc, lorsque le corps recevra à chaque passage des ouvertures autant qu'il perdra pendant le passage de la moitié des espaces pleins des disques, c'est-à-dire pendant le passage nécessaire pour que l'observateur voie le corps, le maximum sera atteint. Comme l'intensité lumineuse n'augmente plus ensuite, il en résulte que la loi qui règle la déperdition est la même que celle qui régit l'absorption de la lumière.

Il suit de là, si cette supposition est exacte, que si l'on pouvait déterminer à partir de quelle limite l'intensité lumineuse n'augmente plus, on aurait pour l'intensité lumineuse que l'on considère la limite du temps nécessaire pour donner le maximum d'effet à un corps qui reste exposé à l'action de la lumière extérieure. Il n'est pas possible de déterminer cette limite d'une manière certaine, car lorsqu'on approche de celle-ci, les différences entre les intensités lumineuses deviennent inappréciables. On voit aussi, d'après la supposition précédente, que le maximum d'effet donné dans le phosphoroscope serait plus petit que celui que l'on obtiendrait si la lumière agissait sur le corps d'une manière continue pendant l'observation. Néanmoins, comme on

le verra dans le paragraphe suivant, si l'on connaît la loi de déperdition de la lumière, on peut arriver à évaluer l'effet maximum dont il s'agit.

Puisque l'on a un moyen, à l'aide du phosphoroscope, d'étudier l'action exercée de la part de la lumière sur un corps en arrivant à une vitesse telle que l'on observe le maximum d'action, il est nécessaire d'examiner comment avec la même substance l'intensité de la lumière émise varie, alors que l'intensité de la lumière incidente change entre des limites déterminées. Pour résoudre cette question, en avant du phosphoroscope et derrière l'ouverture du volet de la chambre noire (1), on a disposé une ouverture rectangulaire formée par la juxtaposition de deux plaques métalliques à faces parallèles ; une des plaques est fixe, l'autre est mobile à l'aide d'une vis micrométrique, de sorte que la largeur de l'ouverture peut varier par centièmes de millimètre depuis zéro jusqu'à 60 millimètres. Il est évident que le faisceau de rayons lumineux réfléchis par l'héliostat a un volume qui dépend de la surface de l'ouverture qu'il traverse. Si l'on place une lentille derrière l'ouverture, et que le corps impressionnable placé dans le phosphoroscope soit au foyer de cette lentille, à ce foyer on recevra une image circulaire du disque solaire dont la dimension sera la même quelle que soit la largeur de l'ouverture ; on voit donc que l'intensité de la lumière active incidente dans la partie illuminée du corps sera proportionnelle à la largeur de l'ouverture, c'est-à-dire à la distance des deux plaques. A l'aide de cette disposition très-simple, et en opérant assez rapidement pour que le faisceau incident se trouve dans les mêmes conditions d'intensité, on pourra faire varier dans le cours d'une même expérience l'intensité des rayons actifs entre des limites parfaitement déterminées.

On a opéré successivement en plaçant dans le phosphoroscope la chaux carbonatée lumineuse orangée (qui donne le maximum d'effet pour la moindre vitesse de l'appareil), l'alumine (rubis) et le verre d'urane. La largeur de l'ouverture a été déterminée en tours de la vis micrométrique de l'écran, un tour équivalant à $\frac{1}{2}$ millimètre. On a placé successivement différents verres colorés au devant de l'oculaire A du photomètre représenté fig. 3, pag. 74, afin d'avoir, avec la lampe Carcel servant de source lumineuse, les teintes orangées, rouges et vertes semblables à celles présentées par les matières impressionnables dans le phosphoroscope. On a eu :

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 57.

| SUBSTANCES soumises à l'expérience. | LARGEUR L de l'ouverture traversée par les rayons solaires incidents. | LUMIÈRE ÉMISE DANS LE PHOSPHOROSCOPE. ANGLE du photomètre. (Le zéro correspond au croisement des prismes de Nicol.) | SINUS CARRÉ $S^2$, ou intensité lumineuse, le rayon étant 1. | RAPPORT $\frac{S^2}{L}$ de l'intensité de la lumière émise à l'intensité de la lumière incidente. |
|---|---|---|---|---|
| | tours mm | ° | | |
| Carbonate de chaux lumineux orangé. | 2 ou 1 | 2.35′ | 0,0020316 | 0,001016 |
| | 4 | 3.25 | 0,0035518 | 0,000888 |
| | 8 | 5. 0 | 0,0075962 | 0,000950 |
| | 16 | 7.10 | 0,0155640 | 0,000973 |
| | 24 | 9. 0 | 0,0244720 | 0,001020 |
| | 32 | 10.35 | 0,0337330 | 0,001054 |
| | 40 | 11.25 | 0,0391810 | 0,000980 |
| | 48 | 13. 0 | 0,0506030 | 0,001054 |
| | | | | Moy. 0,000992 |
| | tour | | | |
| Alumine (rubis). | 1 ou $0^m,5$ | 14.35 | 0,0633970 | 0,063397 |
| | 4 | 29.40 | 0,0244980 | 0,061245 |
| | 8 | 51. 0 | 0,6039550 | 0,075494 |
| | 12 | 75.40 | 0,9387100 | 0,078226 |
| | 16 | 84.15 | 0,9899600 | 0,061875 |
| | | | | Moy. 0,068047 |
| Alumine (rubis). | 1 tour | 14.30 | 0,0626900 | 0,062690 |
| | 2 | 21.40 | 0,1363150 | 0,068157 |
| | 3 | 25 22.5 | 0,1836500 | 0,061216 |
| | 4 | 30. 0 | 0,2500000 | 0,062500 |
| | 6 | 42.30 | 0,4564200 | 0,076070 |
| | 8 | 48. 5 | 0,5537100 | 0,069213 |
| | | | | Moy. 0,066410 |
| Verre d'urane. | 1 tour | 10.10 | 0,031156 | 0,031156 |
| | 2 | 14.55 | 0,066262 | 0,033131 |
| | 4 | 22 35′ | 0,147475 | 0,036869 |
| | 8 | 33. 0 | 0,296630 | 9,037080 |
| | 16 | 51.40 | 0,615310 | 0,038450 |
| | 32 | 77.10 | 0,950565 | 0,029690 |
| | | | | Moy. 0,034397 |

On reconnaît, à l'inspection de ce tableau, que les nombres inscrits dans la cinquième colonne, et qui sont les rapports entre l'intensité de la lumière émise et celle de la lumière incidente, sont sensiblement égaux. Avec le carbonate de chaux, les différences sont assez petites, avec les deux autres corps elles sont plus grandes; mais les rapports sont tantôt supérieurs, tantôt inférieurs à la moyenne. Ces différences tiennent probablement aux erreurs provenant de la méthode photométrique elle-même. Il résulte donc de là que l'intensité de la lumière émise par les substances impressionnables est proportionnelle à la largeur de l'ouverture par laquelle la lumière solaire pénètre dans la chambre obscure, c'est-à-dire à l'intensité de la lumière incidente dans les limites de 1 à 30 fois l'intensité primitive. Or, on a trouvé que les rayons solaires simplement réfléchis par l'héliostat et impressionnant directement les corps donnent une intensité 16 $\frac{1}{2}$ fois moins forte qu'avec une ouverture correspondante à 8 tours de la vis micrométrique ou à 4 millimètres de largeur, c'est-à-dire qu'ils produisent le même effet que les rayons solaires concentrés par la lentille et qui traversent une ouverture de $\frac{1}{4}$ de millimètre environ. Ainsi, dans les limites comprises entre 1 et 96 fois la lumière solaire concentrée au foyer d'une lentille (1), l'intensité de la lumière émise par les corps en vertu de leur action propre est proportionnelle à l'intensité de la lumière excitatrice.

J'ai essayé de démontrer également cette proportionnalité en plaçant successivement le phosphoroscope à différentes distances du foyer d'une lentille sur laquelle on a projeté un faisceau de rayons solaires parallèles; l'image circulaire reçue au delà de la lentille a une dimension d'autant moindre que l'on s'approche davantage du foyer, et il semble que l'intensité lumineuse puisse se déduire de la position du corps et de la grandeur de l'image circulaire dans laquelle se trouvent compris tous les rayons solaires incidents; mais les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité de la lentille font que si la quantité totale de lumière est toujours la même, celle-ci se trouve distribuée inégalement et l'éclat lumineux de la partie centrale qui frappe le corps ne varie pas exactement en raison inverse du diamètre de l'image éclairée reçue au delà de la lentille. On ne peut donc pas

(1) La lentille employée était en crown, et avait $0^m,085$ d'ouverture et 25 centimètres de distance focale.

prendre ces distances comme servant à comparer les intensités de la lumière incidente. Le moyen employé précédemment, et d'après lequel, la lentille restant fixe, on fait varier la quantité de lumière que l'on projette sur une même étendue de sa surface, est à l'abri de toute objection et conduit directement à la démonstration du principe énoncé plus haut.

Je rapporterai encore ici les résultats obtenus en éclairant à l'aide des rayons solaires simplement réfléchis un fragment d'alumine et un morceau verre d'urane, puis en les plaçant au foyer de la lentille, mais en prenant une ouverture déterminée pour donner accès aux rayons solaires réfléchis, qui tombaient sur la lentille :

Avec l'alumine (rubis) excitée par les rayons solaires simplement réfléchis on a eu, au photomètre, un angle de 10° 43′, ce qui donne pour le carré du sinus, ou intensité de la lumière émise, 0,034579 ; les rayons solaires concentrés par la lentille, l'ouverture du volet ayant 4 millimètres de largeur et 40 de hauteur, ont conduit à une valeur photométrique mesurée par un angle de 48° 17′, c'est-à-dire par le carré du sinus de cet angle, ou 0,557180. Le rapport des intensités lumineuses dans les deux cas est donc de $\frac{557180}{34579} = 16,1$.

Avec le verre d'urane, l'action des rayons solaires simplement réfléchis a donné au photomètre un angle de 9° 45′, dont le carré du sinus mesurant l'intensité lumineuse est 0,028679 ; les rayons solaires concentrés avec la lentille, l'ouverture du volet ayant 4 millimètres de largeur et 40 de hauteur, ont conduit à un angle qui mesuré au photomètre a été de 41° 5′, dont le carré du sinus est 0,484010 ; le rapport des intensités lumineuses dans les deux cas est donc de $\frac{484010}{28679} = 16,9$.

Le même verre soumis à l'influence des rayons concentrés par la lentille, mais l'ouverture du volet ayant 8 millimètres de largeur sur 40 de longueur c'est-à-dire le double de section que précédemment, a donné au photomètre un angle de 89° 10′, dont le carré du sinus est 0,999790 ; le rapport de l'intensité lumineuse avec celle que donnent les rayons solaires simplement réfléchis est donc $\frac{999790}{28679} = 34,8$.

On voit que ces rapports ont été sensiblement les mêmes avec les deux substances et également proportionnels aux dimensions de l'ouverture qui a donné accès à la lumière.

Entre les limites de 1 à 100 fois l'intensité de la lumière solaire, et à plus forte raison au-dessous, l'intensité de la lumière émise par les substances en vertu de leur action propre est donc sensiblement proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente. Cette loi se continue-t-elle au delà ? C'est ce que je n'ai pu vérifier, vu l'élévation de température des matières placées au foyer de la lentille, laquelle modifie les effets lumineux, comme on le verra plus loin.

il serait intéressant de savoir quelle peut être l'intensité maximum de la lumière émise par un corps par rapport à celle des rayons actifs ? Il est bien difficile de répondre à cette question; car en général la teinte des rayons émis n'est pas la même que celle des rayons actifs, c'est-à-dire qu'il n'y a aucun rapport entre la réfrangibilité des rayons émergents du corps et celle des rayons incidents. Ainsi, par exemple, les rayons invisibles ultra-violets peuvent exciter très-vivement certaines substances impressionnables; dans ce cas, l'intensité des rayons excitateurs ne peut être évaluée, puisqu'ils n'agissent pas sur la rétine, ou du moins leur action lumineuse peut être considérée comme zéro, tandis celle que des rayons émis est assez forte. D'un autre côté, quand on veut comparer entre elles des lumières de teintes différentes, on ne peut obtenir des résultats précis. Cependant, pour donner une limite approximative, je rapporterai les résultats de la comparaison entre la lumière émise par l'azotate d'urane ou le double phosphate d'urane et de chaux et celle de la lumière solaire incidente. (Ce sont les matières qui m'ont paru les plus lumineuses dans le phosphoroscope.)

On a commencé par déterminer les rapports des coefficients d'absorption de la lumière dans son passage au travers des deux lunettes du photomètre fig. 3, c'est-à-dire d'une part au travers des deux prismes de Nicol, de l'objectif et de l'oculaire, et d'autre part par la réflexion totale et par le passage au travers de l'objectif et de l'oculaire. On s'est servi de la lampe Carcel, d'une bougie stéarique et de plusieurs verres jaunes agissant comme écrans absorbants des deux lumières comparées.

On a dirigé le tube droit AB sur la partie moyenne de la flamme de la bougie et de côté la lunette CD sur la partie moyenne de la flamme de la lampe. La lumière de la lampe étant plus vive, on a interposé successivement au-devant d'elle plusieurs écrans de verre jaune; deux d'entre eux ont amené l'égalité des lumières, les deux prismes de Nicol ayant leurs sections principales parallèles. Si on appelle L l'éclat

lumineux de la partie moyenne de la flamme de la lampe et B celle de la bougie, $\alpha$ le coefficient d'absorption au travers de la lunette AB, $\beta$ au travers de la lunette CD, et $\delta$ celui des deux verres jaunes, on aura, d'après cette expérience, l'angle compté à partir du croisement des deux prismes de Nicol étant 90°,

$$B.\ \alpha.\ \sin^2 90^\circ = L.\ \beta.\ \delta,$$

c'est-à-dire

$$(1) \qquad B\,\alpha = L\,\beta\delta.$$

On a ensuite changé la position des lumières sans changer le photomètre de place, et l'on a dirigé la lunette AB sur la lampe et la lunette CD sur la bougie, d'abord sans les deux verres jaunes, ensuite avec eux, et dans chaque cas on a fait tourner l'oculaire de façon à amener les deux images juxtaposées à être égales en intensité ; dans le premier cas il a fallu tourner le prisme de Nicol oculaire de 18°, dans le second cas de 73°.

On a, d'après ces expériences :

$$(2) \qquad L.\ \alpha.\ \sin^2 18^\circ = B.\ \beta,$$

$$(3) \qquad L.\ \delta.\ \alpha \sin^2 73^\circ = B.\ \beta.$$

En prenant dans la troisième équation la valeur de L $\delta$, la portant dans la première et réduisant, il vient

$$(4) \qquad \frac{\beta}{\alpha} = \sin 73^\circ = 0{,}9563.$$

Tel est le rapport des quantités de lumière absorbées en traversant les systèmes réfringents des deux lunettes du photomètre. En portant cette valeur dans la seconde équation citée plus haut, il vient

$$(5) \qquad \frac{L}{B} = \frac{\sin 73}{\sin^2 18} = \frac{0{,}95630}{0{,}09549} = 10{,}01,$$

c'est-à-dire que la partie moyenne de la flamme de la lampe a un éclat 10 fois supérieur à celui de la bougie. Ce rapport n'est pas exactement le même que celui des pouvoirs éclairants des deux flammes, ainsi qu'on

l'a expliqué antérieurement, livre III, page 97, les surfaces des sources lumineuses n'étant pas les mêmes.

En cherchant à comparer la lumière émise par le double phosphate d'urane et de chaux et par l'azotate d'urane, placés dans le phosphoroscope et excités au moyen des rayons solaires simplement réfléchis sur la glace métallique de l'héliostat, on a trouvé par un ciel bien pur, les 4 et 5 juillet 1860 à dix heures du matin, et en plaçant deux écrans en verre vert devant la lampe, que pour amener l'égalité dans l'intensité des images il fallait tourner l'oculaire du photomètre,

| | Le 4 juillet. | Le 5 juillet. |
|---|---|---|
| Pour l'azotate d'urane de. . . . . | 15° 5′ | 18° 25′ |
| Pour le double phosphate de. . . . . | 18° 0′ | 21° 40′ |

En admettant le nombre 21°, le carré du sinus, qui est 0,1363, représente l'intensité de la lumière émise par ce dernier composé le 5 juillet à dix heures du matin.

Si l'on cherche à comparer l'intensité la lumière de la lampe avec celle de la bougie, soit seule, soit après avoir traversé deux verres colorés en vert, on n'a plus des images de même couleur, et les déterminations deviennent douteuses ; cependant, j'ai jugé approximativement que la bougie étant de côté et mise à la place des sels d'urane, les angles donnés par le photomètre pour l'égalité de l'éclat des images ont été :

| | Angle du photomètre. | Carré du sinus ou intensité lumineuse. |
|---|---|---|
| Avec les rayons émanés de la bougie. . | 45° 0′ | 0,500, |
| Avec les rayons traversant les deux verres verts. . . . . | 22° 50′ | 0,150. |

On voit qu'il ne passe au travers des deux verres que 0,30 de la lumière de la bougie ; par conséquent, dans l'expérience avec le phosphate d'urane, s'il n'y avait pas de verre vert devant la lampe, on ne trouverait qu'un nombre qui serait 0,1363. 0,3 = 0,041 par rapport à la lumière prise pour unité. D'un autre côté, la bougie seule donnant 0,50, on voit donc que l'éclat de la lumière émise par le phosphate d'urane excité par les rayons solaires réfléchis est les $\frac{0,041}{0,500} = 0,082$

de celui de la partie moyenne de la flamme de la bougie. Quand on pense qu'à l'aide d'une lentille on peut concentrer la lumière solaire incidente de façon à ce que l'éclat de la substance impressionnée dans le phosphoroscope soit au moins cent fois plus fort, ainsi qu'on l'a dit antérieurement, on voit que l'éclat de cette substance ainsi excitée serait au moins égale à huit fois celui d'une bougie. Cette détermination donne une idée de la puissance de l'intensité lumineuse qui peut être observée dans le phosphoroscope.

On a vu, dans les préliminaires, quelle était l'intensité lumineuse du soleil par rapport à celle d'une bougie, on pourrait donc connaître approximativement quelle est l'intensité de la lumière émise par le corps phosphorescent par rapport à celle de la lumière incidente. On a mis alors à la place du phosphoroscope et à la hauteur des corps observés antérieurement un écran percé d'une ouverture que l'on a éclairé avec les rayons solaires réfléchis; on a dirigé vers cette ouverture le tube AB du photomètre fig. 3; on a placé du côté CD successivement une lampe L et une bougie B, puis on a tourné les prismes de Nicol, de façon à ce que l'intensité de l'image de l'ouverture éclairée par le soleil fût égale à celle des autres sources lumineuses. On a eu successivement :

| | Angle du photomètre. | Carré du sinus de l'angle. |
|---|---|---|
| Avec la lampe. . . . . | 0° 48′ | 0,00019494 |
| Avec la bougie. . . . . | 0° 15′ | 0,00001904. |

D'après les notations adoptées plus haut, en appelant S l'éclat lumineux relatif au soleil après la réflexion, on a

$$L.\,\mathcal{E} = S.\,\alpha \sin^2 (0^\circ\, 48') \quad \text{et} \quad B.\,\mathcal{E} = S.\,\alpha.\,\sin^2 15'.$$

On voit d'abord que la valeur du rapport de l'éclat de la lampe à celui de la bougie est peu différent du rapport qui a été donné précédemment, puisque les deux équations étant divisées terme à terme donnent

$$\frac{L}{B} = \frac{\sin^2 48'}{\sin^2 15'} = 10{,}2\,,$$

au lieu de 10 trouvé plus haut.

On a ensuite pour l'éclat de la bougie comparée à celui du soleil :

$$B = S \frac{\sin^2 (0^\circ 15')}{\sin 73^\circ} = 0{,}00002.$$

C'est-à-dire que l'éclat du soleil vu par réflexion sur le miroir de l'héliostat serait à peu près celui de 50000 bougies (1). Comme on a vu plus haut que l'éclat de la lumière émise par le phosphate d'urane excité par les rayons solaires réfléchis était de 0,08 environ de celui de la bougie, il serait donc de 0,00002 × 0,08 de celui du soleil, c'est-à-dire 0,0000016 ou un peu plus de 1 $\frac{1}{2}$ millionième de l'éclat de la lumière solaire incidente excitatrice. Telle serait, d'après cela, la limite du degré d'excitation des corps les plus lumineux par phosphorescence par rapport à la lumière solaire active.

Cette détermination, je le répète encore, n'est que bien approximative, car on a été obligé de comparer des lumières d'inégale couleur, ce qui ne saurait se faire avec exactitude ; il ne faut la considérer que comme donnant seulement une limite supérieure, car dans la plupart des cas l'intensité de la lumière émise par les corps comparée à celle de la lumière incidente est bien inférieure à la valeur précédente. D'un autre côté, comme on l'a vu précédemment, cette détermination se rapporte à la lumière solaire, et avec d'autres sources lumineuses, ou même avec les rayons différemment réfrangibles de la lumière solaire elle-même, on pourrait obtenir d'autres résultats; en effet, des rayons qui agissent peu et pour ainsi dire point sur la rétine, comme les rayons ultra-violets, peuvent exciter très-vivement les corps, tandis que des rayons jaunes ou rouges très-lumineux peuvent se comporter comme inactifs par rapport à la plupart des substances impressionnables.

Bien que l'intensité de la lumière émise par action propre ne soit pas un caractère physique essentiel dépendant de la nature des corps, puisque cette intensité peut varier suivant leur état physique, néanmoins je rappellerai les résultats obtenus dans la comparaison de l'intensité de la lumière émise par quelques substances lors de leur maximum d'action, c'est-à-dire au maximum de vitesse du phosphoroscope. On suppose que ces matières placées dans le phosphoroscope

(1) Voir préliminaires, page 2.

ont même épaisseur et qu'elles sont excitées par un faisceau de rayons qui ont conservé sensiblement la même intensité. Les actions sont rapportées à celles présentées par l'azotate d'urane :

| | |
|---|---|
| Double phosphate d'urane et de chaux | 138,750 |
| Azotate d'urane | 100 |
| Sulfure de strontium (lumineux vert) | 6,000 |
| Sulfure de calcium (lumineux bleu) | 4,261 |
| Sulfure de barium (lumineux vert) | 2,817 |
| Verre (crown ordinaire) | 0,184 |
| Sulfure de calcium (lumineux vert) | 0,136 |
| Diamant (lumineux bleu) | 0,123 |
| Fluorure de calcium (chlorophane verte) | 0,079 |
| Mellite (lumineuse verte) | 0,033 |
| Silicate de chaux naturel (Wollastonite) | 0,029 |

§ 5. *Vitesse de déperdition de la lumière émise par un corps phosphorescent quand l'émission est de très-courte durée. Pouvoir émissif et capacité des différents corps pour la lumière.*

On a vu précédemment qu'un corps qui vient d'être exposé à l'influence de la lumière, s'il se trouve subitement placé dans l'obscurité émet de la lumière pendant un temps plus ou moins long suivant sa nature et son état physique ; son extinction peut avoir lieu après une fraction de seconde, comme on l'observe avec la plupart des corps placés dans le phosphoroscope, ou bien après plusieurs heures comme le montrent les sulfures alcalino-terreux. Mais la loi d'extinction est-elle la même pour tous les corps; ne varie-t-elle pas avec l'intensité de la lumière active ? Telles sont les questions qui sont à étudier.

On conçoit que l'on peut représenter l'action moléculaire communiquée au corps par la lumière, pendant un temps déterminé, par une quantité qui dépend du pouvoir absorbant de ce corps et de sa capacité pour la lumière ; en outre, une fois l'action transmise au corps, celui-ci en vertu de son pouvoir émissif peut émettre des rayons de différentes longueurs d'onde. D'après cela, la capacité et le pouvoir émissif ou absorbant devraient se rapporter à l'action totale de la lumière; mais en raison même de la diversité des effets produits, et comme l'on n'étudie dans ce livre que les questions relatives aux effets

de phosphorescence, je ne me servirai ci-après de ces expressions comme ne devant se rapporter qu'à la phosphorescence des corps ou émission lumineuse en vertu de l'action propre de ceux-ci.

La rapidité d'émission des rayons doit dépendre du pouvoir émissif du corps et de sa capacité; mais un certain nombre de corps émettant des rayons de durée inégale, soit de même nuance, soit de couleur différente, doivent présenter des effets complexes puisque la capacité et le pouvoir émissif varient, dans le même corps, pour ces divers rayons. Néanmoins, avec le plus grand nombre des corps, on n'observe pas de changements de couleur dans le phosphoroscope, ou du moins un des effets lumineux domine tellement les autres, que la détermination des intensités lumineuses se fait comme si les couleurs ne changeaient pas pendant l'expérience. La température fait également varier les éléments qui entrent dans l'expression de la rapidité de l'extinction de la lumière du corps; mais il n'en sera question que plus loin, et l'on supposera ici que les corps restent à la température ambiante.

On supposera également dans ce qui va suivre que les corps sont impressionnés par la lumière blanche du soleil, et qu'ils émettent, pendant leur extinction, des rayons de même couleur quoique d'une nuance différente de celle des rayons actifs; les corps qui vont être soumis à l'expérience se trouvent réaliser cette seconde condition.

La supposition la plus simple que l'on puisse faire est d'admettre que la loi de l'extinction lumineuse des corps est analogue à celle qui représente leur refroidissement quand ils sont échauffés; or, sans connaître la loi exacte, on peut supposer que pour de faibles différences d'intensité lumineuse et alors que l'émission a lieu dans l'obscurité, une expression qui se borne au premier terme d'une série exponentielle comme la formule dite *formule de Newton*, peut rendre compte des résultats des expériences.

Dans cette hypothèse, soient $I_0$ l'intensité des rayons actifs incidents, et $i_0$ l'intensité de la lumière émise par le corps quand le maximum est atteint, au moment où la lumière I cesse d'agir et où le corps se trouve subitement placé dans l'obscurité. Soient deux quantités constantes E et C qui représentent le pouvoir émissif de la partie du corps qui émet de la lumière et sa capacité pour la lumière ou le pouvoir qu'il possède d'exiger une somme d'action plus ou moins forte de la portion de l'agent lumineux qui agit sur lui, pour donner, par

phosphorescence, une émission de rayons d'une intensité déterminée. Quant au pouvoir absorbant, on peut le regarder comme égal au pouvoir émissif. On suppose que le corps est d'une dimension très-petite et que son épaisseur est telle, que tous ses points ont en même temps la même intensité lumineuse; on admet encore que la lumière émise dans les différentes directions par rapport à sa surface possède au même instant la même intensité, c'est-à-dire que l'épaisseur de la surface extrême du corps ne modifie pas la loi d'émission. Cette supposition n'est pas rigoureusement exacte, mais la formule à laquelle on est conduit permet de comparer les effets produits lorsque la lumière est émise toujours dans une même direction par rapport à la surface, direction qui dans ces expériences est la normale à la surface de sortie des rayons lumineux. On peut se borner à chercher quel est l'effet produit par une molécule du corps ou par un espace qui aurait la même étendue dans toutes les expériences comparatives, afin de n'avoir point à introduire dans le calcul l'étendue et la masse du corps.

La vitesse V de déperdition de la lumière, d'après l'hypothèse précédente, sera proportionnelle à l'intensité lumineuse du corps, puisque ce dernier étant dans l'obscurité ne reçoit plus de lumière : elle sera donc égale à $-\frac{E}{C}i$, et on aura

$$V = \frac{di}{dt} = -\frac{E}{C}i, \tag{1}$$

$t$ étant le temps compté depuis l'origine de l'extinction du corps.

On peut faire $\frac{E}{C} = a$ (nous verrons revenir par la suite le coefficient $a$, qui est proportionnel au rapport du pouvoir émissif à la capacité des corps pour la lumière); l'équation (1) devient alors

$$\frac{di}{dt} = -ai,$$

en intégrant cette équation et en déterminant la constante arbitraire qui s'introduit par la condition que l'on ait $i = i_0$ pour $t = 0$, on obtient

$$i_t = i_0 e^{-at}, \tag{2}$$

$i_t$ étant l'intensité lumineuse du corps après le temps $t$; $e$ désigne ici la base des logarithmes népériens; mais rien n'empêche de supposer $e = 10$, car cela revient évidemment à multiplier le coefficient $a$ par l'inverse du module des logarithmes vulgaires, c'est-à-dire par une constante qui reste la même dans toutes les déterminations expérimentales.

Voyons si cette formule rend suffisamment compte des résultats de l'expérience.

Il est nécessaire de pouvoir maintenir le phosphoroscope en rotation avec une vitesse uniforme, afin de déterminer, avec le photomètre, l'intensité lumineuse correspondant à une vitesse donnée, c'est-à-dire à un intervalle de temps connu qui sépare l'instant de l'insolation du corps du moment de l'observation. Si la vitesse de rotation est uniforme, comme l'intensité de la lumière incidente ne change pas dans un intervalle de temps très-court, l'intensité lumineuse sera également uniforme.

Pour maintenir la vitesse constante pendant la durée d'une expérience, j'ai d'abord adapté sur l'axe du phosphoroscope un tambour autour duquel était enroulée une corde; cette corde passait autour d'une poulie suspendue au haut de la chambre noire, et à l'aide d'une autre poulie mouflée faisait tourner le phosphoroscope au moyen d'un poids. Une palette mobile avec l'appareil, faisant volant par la résistance de l'air, rendait la rotation uniforme. Ce procédé est exact, mais peu expéditif, et demande certaines précautions.

J'ai fait également usage du moyen qui consiste simplement à faire mouvoir la manivelle du phosphoroscope à la main, en ayant soin que l'opérateur dans chaque expérience suive le mouvement d'un pendule dont on fait varier la longueur; une autre personne suit avec un compteur à pointage le mouvement du phosphoroscope et marque la vitesse de chaque tour de la manivelle; quand l'intensité de la lumière émise par le corps dans le phosphoroscope est constante, on note à l'aide du compteur la vitesse de rotation au moment de l'observation. Ce moyen nécessite plusieurs opérateurs; mais il m'a donné des résultats parfaitement comparables, et qui ont concordé avec ceux trouvés par la précédente méthode; je dois même ajouter qu'un phosphoroscope mis en mouvement par un fort mouvement d'horlogerie n'a pas donné de résultats plus précis.

Dans les expériences dont les résultats sont indiqués plus loin, on a

donné en secondes de temps la vitesse du grand axe du phosphoroscope, et on en a déduit le temps $t$ qui sépare l'instant où l'insolation cesse du moment de l'observation moyenne, en millièmes de seconde.

Ainsi l'expérience donne les intensités lumineuses $i$, $i'$, $i''$, etc., quand les temps qui séparent l'insolation du moment de l'observation sont $t$, $t'$, $t''$, etc..., évalués en millièmes de seconde.

Si la loi énoncée plus haut est exacte, on doit avoir d'après la formule (2)

$$\log i = \log i_0 - at, \log i' = \log i_0 - at', \text{ etc...} \tag{3}$$

d'où

$$\frac{\log i' - \log i}{t - t'} = a, \quad \frac{\log i'' - \log i'}{t' - t''} = a, \ldots,$$

c'est-à-dire que les différences entre les logarithmes des intensités lumineuses doivent être proportionnelles aux différences des temps, et que leur rapport doit donner précisément le coefficient $a$.

Les expériences suivantes ont été faites avec différents composés d'uranium, le verre d'urane, le double phosphate d'urane et de chaux, le double sulfate de potasse et d'urane et l'azotate d'urane : on rapporte seulement un tableau des expériences faites avec le verre d'urane (1) :

(1) Pour les autres résultats, voir *Ann. de chim. et de physique*, t. 62, p. 42 et suivantes.

*Verre d'urane, la lumière émise est verte.*

| INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE SOLAIRE INCIDENTE. | OBSERVATION DU TEMPS. | | INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE ÉMISE PAR LE CORPS. | | | Valeur MOYENNE de *a*. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temps d'un tour du grand axe du phosphoroscope, en secondes. | Temps *t* qui sépare le moment de l'insolation de celui de la vision, en millièmes de seconde. | Angle donné par le photomètre. | Angle du photomètre. (Par le calcul). | Double du logarithme du sinus de l'angle observé. | |
| Rayons solaires simplement réfléchis, l'intensité est supposée 1. | s<br>2,34<br>1,66<br>1,32 | 1,5444<br>1,0956<br>0,8712 | o '<br>5.00<br>5.50<br>7.15 | o '<br>4.35<br>6.13<br>7.15 | 1,8805920<br>2,0140872<br>2,2021116 | 0,5878 |
| Rayons déjà concentrés, 3,27 | 3,34<br>1,82<br>1,49 | 2,2044<br>1,2012<br>0,9834 | 6.35<br>9.12<br>11.55 | 5.16<br>10.18<br>11.55 | 2,1187344<br>2,4075948<br>2,6297930 | 0,5756 |
| Rayons concentrés, 15,00 | 10,00<br>7,20<br>2,80<br>1,94<br>1,40 | 6,6000<br>4,7520<br>1,8480<br>1,2804<br>0,9240 | 0.50<br>2.25<br>13.15<br>20.55<br>27.55 | 0.37<br>2.07<br>14.42<br>21.39<br>27.55 | 0,3253616<br>1,2499306<br>2,7204308<br>3,1053602<br>3,3408384 | 0,5756 |
| Id., rayons plus concentrés, 73,00 | 8,00<br>7,20<br>4,63<br>3,02<br>2,42<br>1,52 | 5,2800<br>4,7520<br>3,0558<br>1,9932<br>1,5972<br>1,0032 | 4.00<br>5.20<br>17.47<br>30.15<br>38.10<br>60.55 | 4.26<br>5.59<br>15.51<br>29.52<br>38.36<br>60.55 | 1,6871690<br>1,936497<br>2,9697902<br>3,4054714<br>3,5819082<br>3,8829370 | 0,4924 |
| Au foyer de la lentille, 110,02 | 7,00<br>5,00<br>2,40<br>1,96 | 4,6200<br>3,3000<br>1,5840<br>1,2936 | 8.20<br>17.20<br>57.35<br>90.00 | 7.14<br>16.39<br>56.26<br>90.00 | 2,3223278<br>2,9482292<br>3,8528620<br>4 | 0,5409 |
| | | | | | Moy. | 0,5546 |

Avec les autres composés d'uranium, on a eu, en moyenne, pour la valeur de $a$ :

Avec le double phosphate d'urane et de chaux :

| | | | Valeur moyenne de $a$. |
|---|---|---|---|
| Rayons solaires réfléchis, | intensité | 1..... | 0,8030 |
| — concentrés avec une lentille, | id. | 2,96..... | 0,8015 |
| — plus concentrés, | id. | 10,19..... | 0,8182 |
| — id. | id. | 13,22..... | 0,8599 |
| | | Moyenne..... | 0,8206 |

Avec le double sulfate d'urane et de potasse :

| | | | Valeur moyenne de $a$. |
|---|---|---|---|
| Rayons solaires réfléchis, | intensité | 1..... | 1,4227 |
| — avec une lentille, | id. | 2,79..... | 1,4712 |
| — plus concentrés, | id. | 9,74..... | 1,2667 |
| | | Moyenne..... | 1,3869 |

Avec l'azotate d'urane :

| | | | Valeur moyenne de $a$. |
|---|---|---|---|
| Rayons solaires réfléchis, | intensité | 1..... | 0,3530 |
| — concentrés, | id. | 5,97..... | 0,4136 |
| — id. | id. | 32,12..... | 0,4394 |

Autre série d'expériences :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Rayons solaires réfléchis, | intensité | 1..... | 0,4455 |
| — concentrés, | id. | 3,06..... | 0,4212 |
| — id. | id. | 44,55..... | 0,4515 |
| | | Moyenne des deux séries..... | 0,4207 |

Si l'on examine d'abord les résultats obtenus avec le verre d'urane, on voit que dans les cinq séries d'expériences, la première a été faite avec les rayons solaires simplement réfléchis sur le miroir de l'héliostat; l'intensité des rayons solaires incidents est alors représentée par 1. On n'a pu faire qu'un petit nombre de déterminations, car l'intensité lumineuse observée, $i$, a été assez faible. On a concentré alors successivement avec une lentille les rayons solaires, et les intensités ont

été 3,27, 15,00, 73,00, 110,02, par rapport à la première ; ces intensités ont été données, dans chaque série d'expériences, par les valeurs de $i_0$ d'après la formule (3), page 277, et une fois que l'on a eu $a$. le rapport des valeurs trouvées à celle de la première expérience a conduit aux nombres précédents, car on a vu page 266 que l'intensité des rayons actifs est proportionnelle à l'intensité des rayons émis.

Les séries d'expériences faites avec les autres substances ont conduit à la même conclusion ; on remarque cependant que tantôt la valeur du coefficient $a$ va en augmentant lorsque l'intensité lumineuse incidente augmente beaucoup, tantôt elle diminue un peu. Cette variation doit provenir, en dehors des erreurs d'observation, de ce que chaque série d'expériences ayant une durée de vingt ou trente minutes au moins, l'intensité lumineuse solaire va en augmentant ou en diminuant, et cela suivant l'heure du jour et l'état de l'atmosphère. En somme, l'on peut admettre que la valeur du rapport $a$ entre le pouvoir émissif et la capacité des corps ne change pas, pour un même corps, quand l'intensité de la lumière excitatrice solaire varie de 1 à 100.

On voit aussi, d'après ce qui précède, que pour les composés d'uranium qui ont sensiblement même nuance les valeurs de $a$ sont bien différentes.

Les expériences suivantes ont été faites en se servant d'alumine (coryndon) que l'on a placée successivement dans des phosphoroscopes à 4 ouvertures ou à 1 ouverture, puis ensuite au moyen d'un rubis bien lumineux par phosphorescence et d'un fragment d'alumine opaque provenant de la calcination de l'acétate d'alumine à une haute température. On ne donne que les valeurs de $a$, qui sont obtenues comme on l'a indiqué plus haut lorsqu'on a fait usage du verre d'urane.

Alumine, coryndon rouge amorphe, légèrement translucide ; la lumière émise est rouge :

| | Valeur moyenne de $a$. |
|---|---|
| Phosphoroscope à 4 ouvertures. . . . . | 0,0774 |
| Id. à 1 ouverture. . . . . | 0,0791 |

Alumine, coryndon rouge taillé transparent (rubis), lumière rouge.

| | |
|---|---|
| Phosphoroscope à 4 ouvertures. . . . . | 0,0792 |

Alumine opaque précipitée et calcinée, en fragments très-minces, la lumière émise est rouge.

| | |
|---|---|
| La lumière est concentrée ; près du foyer de la lentille. . . | 0,0837 |

On reconnaît que l'alumine amorphe et préparée aussi pure que possible donne pour la valeur de $a$ un nombre à peu près semblable à celui que présente le coryndon naturel cristallisé, bien que l'intensité de la lumière émise, à égalité d'action excitatrice, soit bien différente dans les diverses expériences. Cette remarque est très-importante; elle montre que la nature du corps exerce seule une influence sur la loi du décroissement de la lumière, et que le rapport du pouvoir émissif à la capacité du corps doit rester constant, de même que la composition de la lumière émise reste constante, comme on le verra dans le chapitre 4 (1). Quant à l'intensité de la lumière que le corps peut émettre dans des conditions déterminées, elle peut varier et dépend de circonstances qui échappent à nos investigations.

Ces divers résultats viennent à l'appui de l'hypothèse sur la déperdition de la lumière faite au commencement de ce paragraphe. Mais, en réalité, on ne peut affirmer que l'exponentielle $I = e^{-at}$ soit l'expression exacte de la loi de déperdition de la lumière en vertu de l'action propre des corps, de même qu'elle ne donne pas exactement le refroidissement de ces mêmes corps, mais on peut la regarder comme une formule empirique rendant suffisamment compte des résultats des expériences, et cela quand l'intensité lumineuse active varie entre 1 et 110 fois celle de la lumière solaire incidente; car les erreurs du procédé photométrique employé peuvent expliquer les différences entre les nombres calculés et ceux qui sont déduits de l'expérience. D'un autre côté, tous les corps qui sont lumineux dans le phosphoroscope ne présentent pas des effets semblables; le nombre de ceux qui conduisent à des résultats que l'on peut calculer à l'aide de l'exponentielle citée plus haut doit être assez grand, mais comme l'évaluation des intensités lumineuses exige une certaine intensité de la lumière émise, on n'a pu faire la comparaison qu'au moyen des corps les plus impressionnables. Le tableau qui va être cité plus loin renferme les résultats obtenus avec un certain nombre d'entre eux. On verra, au reste, par la suite quels sont les effets que présentent les corps qui offrent une émission de rayons de différentes réfrangibilités suivant la vitesse du phosphoroscope, comme le diamant, la fluorine, certaines variétés de chaux phosphatée, etc., ou bien qui donnent une émission lumineuse de longue durée, comme les sulfures alcalino-terreux.

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 57, p. 126.

Les corps dont la persistance des impressions lumineuses est plus petite que celle des substances énoncées dans le tableau indiqué ci-après n'ont pu être examinés. Bien que le phosphoroscope à 10 ouvertures dont on a fait mention page 225, et dont la rapidité de rotation est beaucoup plus grande que celle des autres appareils, ait permis de rendre lumineux quelques corps comme les platino-cyanures de potassium et de calcium, cependant la petite dimension des fragments qui y sont placés et le peu de lumière que l'on peut concentrer sur eux ne m'a pas permis de faire la détermination des intensités lumineuses d'une manière précise.

Si l'on admet que l'exponentielle $i_t = i_0 e^{-at}$ représente d'une manière satisfaisante l'intensité lumineuse $i_t$ après le temps $t$, on pourrait en conclure approximativement la quantité totale Q de lumière émise par le corps lumineux, quantité qui mesure la somme d'action communiquée au corps par l'agent lumineux. Il faut admettre toutefois que ce corps a une dimension très-petite et que le passage de la lumière, qui a pénétré à une certaine profondeur au travers de la couche superficielle du corps, ne modifie pas son intensité. D'après cette supposition, cette quantité de lumière Q serait donnée par l'intégrale de la différentielle $i_t dt$, prise depuis $t = 0$, jusqu'à $t = \infty$ : on aurait donc

$$(4) \qquad Q = \int_0^\infty i_0 e^{-at} dt = \frac{i_0}{a},$$

c'est-à-dire que cette quantité serait égale au rapport de l'intensité de la lumière émise à l'origine de l'extinction, au coefficient $a$.

Pour montrer entre quelles limites peuvent varier ces quantités, on a placé dans le tableau suivant, à côté des corps dont les noms se trouvent indiqués, la valeur du coefficient $a$, puis ensuite celle de $i_0$ que l'on a calculé d'après l'intensité lumineuse déduite de la formule (2), page 275, et d'après la valeur de $a$.

Il faut remarquer que la valeur de $a$ est indépendante de l'intensité lumineuse du corps, et représente, avec toutes les substances renfermées dans le tableau, le rapport du pouvoir émissif à la capacité du corps pour la lumière, tandis que les valeurs de $i_0$ et de $\frac{i_0}{a} = Q$ ne peuvent être comparées qu'entre celles d'une même série, les unités de comparaison

n'étant pas les mêmes. On a donné autant que possible la même épaisseurs aux corps avec lesquels on a opéré.

La première série d'expériences est relative aux corps dont la lumière émise est de teinte verte quoique de nuance un peu différente pour chacuns d'eux La 1re colonne renferme le nom du corps impressionnable ; la 2e, la valeur de $a$; la 3e, l'intensité maximum de la lumière émise au maximum de vitesse de l'appareil, l'intensité donnée par l'azotate d'urane étant supposée égale à 100; et la 4e, la valeur de $\frac{i}{a}$, c'est-à-dire Q.

| | Valeur de $a$. | Valeur de $i$. | Valeur de $\frac{i}{a}$. |
|---|---|---|---|
| Uranite naturelle (peu lumineuse)..... | 1,4975 | » | » |
| Carbure d'hydrogène à teinte des sels d'urane | 1,4363 | 0,062 | 0,043 |
| Double sulfate d'urane et de potasse..... | 1,3869 | 64,240 | 46,311 |
| Double phosphate d'urane et de chaux..... | 0,8206 | 138,750 | 169,083 |
| Perchlorure d'uranium et de potassium..... | 0,7682 | 16,950 | 22,064 |
| Verre d'urane..... | 0,5546 | 13,587 | 24,499 |
| Azotate d'urane..... | 0,4207 | 100. | 237,700 |
| Double fluorure d'uranium et de potassium.. | 0,3256 | 68,104 | 209,165 |
| Verre (crown ordinaire)..... | 0,0436 | 0,184 | 4,220 |
| Chaux phosphatée violette..... | 0,0263 | 0,992 | 37,723 |

La deuxième série d'expériences est relative aux corps dont la lumière émise est rouge : l'intensité $i$ donnée par l'alumine (rubis transparent) est supposée égale à 100. L'intensité lumineuse n'est donc pas rapportée à la même unité que dans la série précédente.

| | Valeur de $a$. | Valeur de $i$. | Valeur de $\frac{i}{a}$. |
|---|---|---|---|
| Topaze jaune transparente..... | 0,5546 | 0,124 | 0,223 |
| Silicate d'alumine (disthène)..... | 0,2295 | 1,022 | 4,453 |
| Alumine (rubis)..... | 0,0791 | 100. | 1264,222 |
| Aluminate de magnésie (spinelle octaèdre)... | 0,0094 | 25,685 | 2732,447 |

La troisième série d'expériences est relative aux corps dont la lumière émise est de couleur rouge orangé. On a essayé de rapporter les intensités lumineuses à celle du rubis, quoique les nuances présentées par les deux corps suivants soient différentes.

| | Valeur de $a$. | Valeur de $i$. | Valeur de $\frac{i}{a}$. |
|---|---|---|---|
| Leucophane.... | 0,01470 | 0,777 | 52,857 |
| Carbonate de chaux lumineux orangé (variété prismatique) | 0,00507 | 6,146 | 1212,228 |

On reconnaît à l'inspection de ce tableau que le corps qui présente la valeur la plus petite du coefficient $a$ qui ait pu être déterminée au moyen des phosphoroscopes dont j'ai fait usage est le spath d'Islande; elle est $a = 0,00507$. Certains composés d'uranium donnent un nombre 300 fois plus fort, et des corps organiques, comme le bisulfate de quinine, donnent des valeurs plus élevées que je n'ai pu déterminer avec les appareils dont j'ai fait usage.

On doit attacher plus d'importance à l'examen du coefficient $a$, qui ne dépend que de la nature du corps soumis à l'expérience, qu'à celui des quantités $i_0$ et Q, car celles-ci, sont essentiellement variables suivant des circonstances que l'on ne peut souvent apprécier, et la dernière (la quantité Q) est donnée par une expression basée sur des suppositions qui n'ont pas été complétement vérifiées par expérience.

La valeur de $a$ est déterminée par rapport à l'unité de temps, qui est ici $0'',001$. Si l'unité de temps était 1 seconde, il faudrait multiplier $a$ par 1000, et diviser par conséquent $\frac{1}{a}$ ou Q par le même nombre.

On doit remarquer que le temps nécessaire pour qu'un corps soumis à l'insolation arrive au maximum d'effet est sensiblement en raison inverse de $a$, c'est-à-dire qu'il est sans erreur bien grande proportionnel à $\frac{1}{a}$ : en effet, bien que l'on ne connaisse pas la loi d'admission de la lumière par le corps depuis le moment où il devient actif jusqu'à l'instant où son état lumineux est stationnaire, l'intensité lumineuse $i$, à cet instant, est proportionnelle à l'intensité I de la lumière excitatrice. Or, si l'on nomme $\theta$ le temps nécessaire pour que cet instant soit atteint, $\theta$ étant toujours très-petit et inférieur à une fraction de seconde, on peut supposer que la somme d'action reçue par le corps est proportionnelle d'une part à l'intensité I de la lumière excitatrice, et d'autre part au temps $\theta$ lui-même; et comme I est proportionnel à $i$, comme on l'a vu, cette somme d'action sera alors proportionnelle au produit $\theta i$. Mais, d'un autre côté, cette somme d'action, étant égale à la quantité de lumière que le corps émet, peut être évaluée approximativement, ainsi

qu'on l'a vu plus haut, comme proportionnelle à $\frac{i}{a}$; on aura donc :

$$i\,\theta = k\frac{i}{a},$$

c'est-à-dire,

$$\theta = k.\frac{1}{a},$$

$k$ étant un coefficient constant.

D'après les tableaux précédents le nombre $a$ depuis les sels d'urane jusqu'au carbonate de chaux varie de 1,5 à 0,005, en prenant le millième de seconde pour unité de temps; on voit donc que $\frac{1}{a}$ ou $\theta$ variera dans le rapport de 1 à 300, et s'il ne faut qu'une très-petite fraction de seconde pour que le calcaire atteigne son maximum d'effet quand il est soumis à l'insolation, il ne faudra à plus forte raison qu'un temps 200 à 300 fois plus petit pour les sels d'urane. Pour les platino-cyanures et le bisulfate de quinine, ce temps serait encore moindre. Du reste l'expérience seule, comme on l'a vu dans le § 2, avait conduit à une conclusion analogue.

§ 6. — *Vitesse de déperdition de la lumière quand l'émission lumineuse du corps est de longue durée, c'est-à-dire supérieure à une seconde de temps. Effets presentés par les phosphores artificiels (sulfures alcalino-terreux).*

Lorsque les matières impressionables présentent une persistance dans l'impression lumineuse pouvant durer plus d'une seconde, et quand les rayons de diverse réfrangibilité qu'elles émettent ont des durées inégales, l'exponentielle citée plus haut ne peut représenter d'une manière satisfaisante les résultats des expériences. Les effets donnés par le diamant, le spath fluor et une variété de phosphate de chaux viennent à l'appui de cette conclusion. Les diamants sont ordinairement jaunes pour une faible vitesse du phosphoroscope, puis en général deviennent bleus par une plus grande vitesse; j'ai choisi pour les expériences dont on parlera ci-après un diamant en forme de sphère, et appartenant au Muséum d'histoire naturelle; comme ce diamant devenait presque immédiatement bleu et ne donnait qu'une trace de lumière jaune, je pense que l'effet produit doit se rapporter presque entière-

ment à l'émission de la lumière bleue. Le spath fluor était de la chlorophane verte, extrêmement lumineuse, et paraissant successivement bleue, orangée, puis verte, suivant la vitesse de l'appareil. Le phosphate de chaux était d'abord vert, puis ensuite orangé.

Les expériences suivantes ont été faites avec ces trois substances.

On rapporte seulement dans le tableau ci-après le temps $t$ qui sépare le moment de l'insolation de l'instant de la vision en millièmes de seconde, l'intensité de la lumière émise $i$, et le produit $it$. On a eu d'abord avec le diamant lumineux bleu :

| Temps $t$. | Intensité $i$. | Valeur de $it$. |
|---|---|---|
| 10,560 | 1,9026 | 20,0915 |
| 6,996 | 3,7270 | 26,0741 |
| 3,960 | 6,6192 | 26,2112 |
| 2,746 | 12,8150 | 35,1900 |
| 1,874 | 34,2600 | 64,2169 |

Quant à la valeur de $a$, qui a été de 0,081 entre la 1re et la 2e expérience, elle a conservé la même valeur entre la 2e et la 3e, mais elle est devenue 0,109 entre la 3e et la 4e et 0,490 entre les 2 dernières; ainsi, elle a augmenté beaucoup entre ces limites.

Avec le fluorure de calcium, fluorine verte très-lumineuse, on a eu :

| | | |
|---|---|---|
| 23,760 | 0,4759 | 11,3262 |
| 7,920 | 0,9326 | 7,3862 |
| 1,914 | 4,4695 | 8,5546 |
| 0,918 | 14,1560 | 11,5796 |

La valeur de $a$, qui a été de 0,019 entre la 1re et la 2e expérience, est devenue 0,112 entre la 2e et la 3e, et 0,453 entre la 3e et la 4e; ainsi elle a rapidement augmenté depuis le commencement des expériences.

Avec la chaux phosphatée jaunâtre de Jumillac on a trouvé :

| | | |
|---|---|---|
| 25,476 | 0,2539 | 6,5193 |
| 6,930 | 0,4759 | 3,2979 |
| 2,805 | 0,8995 | 2,5231 |
| 0,871 | 2,2517 | 1,9613 |

La valeur de $a$, qui était 0,015 entre la 1re et la 2e détermination, a été de 0,062 entre la 2e et la 3e et 0,204 entre la 3e et la 4e; elle a donc aug-

menté rapidement entre les limites des déterminations expérimentales.

Ainsi, d'après ces résultats, la valeur de $a$ calculée comme précédemment va en croissant à mesure que le temps diminue, au lieu de rester comprise entre certaines limites peu éloignées, comme avec les substances dont on a parlé dans le § 5. On doit conclure de là que la loi énoncée plus haut, et d'après laquelle on aurait

$$i_t = i_0 e^{-at},$$

n'est pas la loi de la déperdition de la lumière de ces corps phosphorescents, à moins que les substances précédentes ne se trouvent dans des conditions exceptionnelles, dues à la diversité des rayons qu'elles émettent simultanément avec des durées inégales. S'il en était ainsi et que l'on pût admettre, pour chaque groupe de rayons qui ont une persistance différente, une expression exponentielle contenant un coefficient d'extinction particulier, la formule qui représenterait les expériences deviendrait fort compliquée; ainsi, avec le diamant, qui donne deux nuances bien tranchées, en supposant que l'intensité soit donnée par la formule

$$I = i_0 e^{-at} + y_0 e^{-bt},$$

I étant l'intensité lumineuse totale, $i_0$ et $y_0$ les intensités lumineuses pour chaque groupe de rayons quand $t = 0$ et de telle sorte que $I_0 = i_0 + y_0$, on trouve qu'en faisant $a = 0{,}08$ et $b = 1{,}07$, on rend assez bien compte des intensités lumineuses observées. Mais si les corps offrent des persistances inégales pour un plus grand nombre de groupes de rayons (comme par exemple la chlorophane), on serait conduit à une somme d'exponentielles dont le calcul serait beaucoup trop compliqué pour permettre de comparer les résultats des expériences.

Il est donc possible que l'existence dans le faisceau de lumière émise de groupes de rayons qui décroissent d'intensité avec des vitesses différentes soit la cause de ce que les corps dont il est question dans ce paragraphe ne donnent pas des intensités lumineuses qui puissent être représentées par l'expression $i_0 e^{-at}$; mais comme dans la plupart des cas on ne peut distinguer par expérience ces différents groupes, il faut chercher empiriquement si l'on ne pourrait pas lier entre eux d'une autre manière les résultats des observations, sans connaître exactement la loi d'extinction de la lumière émise par ces substances.

On va voir plus loin que l'on peut parvenir, entre certaines limites, à lier empiriquement l'intensité lumineuse au temps, en se fondant sur une remarque qui se déduit déjà des résultats précédents, mais qui sera plus nettement établie plus loin en faisant usage des sulfures alcalino-terreux; cette remarque est que le produit du temps qui sépare l'insolation de l'instant de la vision, par l'intensité de la lumière émise à cet instant, ne varie que dans des limites peu éloignées, ou bien change régulièrement avec ce temps lui-même. On peut voir dans la dernière colonne des tableaux précédents qu'avec le fluorure de calcium ce produit reste à peu près le même, ce qui montre que la vitesse d'extinction de la lumière, abstraction de la couleur, varie, à très-peu près, entre les limites de l'expérience comme le carré de l'intensité lumineuse; car si $ti = c$, on a pour cette vitesse

$$V = \frac{di}{dt} = -\frac{i^2}{c}.$$

Avec les autres substances, ce produit change, mais seulement dans les limites de 1 à 3.

Si l'on place dans le phosphoroscope des substances dont la persistance des impressions lumineuses est très-grande, comme le sulfure de calcium lumineux vert et le sulfure de calcium lumineux jaune, on ne voit pas l'intensité lumineuse changer sensiblement avec la vitesse de rotation de l'appareil. On a déjà parlé antérieurement de cet effet, offert également par le carbonate de chaux spathique et par d'autres corps; il provient de ce que ces corps exigent un certain temps pour être excités par la lumière, et je pense qu'il doit se présenter toutes les fois que l'émission des rayons, par phosphorescence, se fait dans des conditions régulières et que les rayons émis par le corps ont tous le même coefficient d'extinction. Mais si le corps peut émettre simultanément des rayons d'inégale persistance et qui peuvent être de même réfrangibilité, dans ce cas, même avec une longue persistance, il doit changer d'intensité avec la vitesse du phosphoroscope. On peut citer comme exemples le sulfure de strontium lumineux vert et même celui lumineux bleu. Pour observer ces effets, il suffit de placer sur une petite lame de mica, avec un peu de gomme arabique, une couche de ces sulfures réduits en poudre que l'on peut voir alors par transparence dans le phosphoroscope.

Si l'on appelle $t$ le temps qui sépare le moment de l'insolation de l'ins-

tant de la vision en secondes, $i$ l'intensité de la lumière émise, $a$ la valeur du coefficient particulier déterminé comme il a été dit plus haut, on aura pour le sulfure vert de strontium :

| Temps $t$. | Intensité $i$. | Produit $it$. |
|---|---|---|
| 0,0266 | 0,01281 | 0,00034 |
| 0,0073 | 0,03321 | 0,00024 |
| 0,0026 | 0,07987 | 0,00021 |
| 0,0013 | 0,11327 | 0,00015 |

La valeur du coefficient $a$, qui a été trouvée de 0,0220 entre la 1re et la 2e expérience, a été de 0,0806 entre la 2e et la 3e, et 0,1150 entre la 3e et la 4e ; le coefficient a donc augmenté quand le temps $t$ a diminué.

Avec le sulfure lumineux violet on a eu :

| | | |
|---|---|---|
| 0,0393 | 0,02724 | 0,00109 |
| 0,0115 | 0,14338 | 0,00166 |
| 0,0059 | 0,25000 | 0,00149 |
| 0,0020 | 0,56670 | 0,00113 |

La valeur du coefficient $a$, qui était de 0,0255 entre la 1re et la 2e expérience, est devenue 0,0421 entre la 2e et la 3e, et 0,0890 entre la 3e et la dernière; ce coefficient a encore augmenté rapidement.

On voit que ces substances se comportent comme donnant pour valeur de $a$ un nombre qui augmente à mesure que le temps diminue.

D'un autre côté, il est facile de montrer qu'avec le premier sulfure on a l'exemple d'un corps qui donne une émission de rayons de durée différente quoique de même réfrangibilité, et cela suivant la réfrangibilité des rayons excitateurs; il suffit, comme on le dira plus loin chapitre IV, de placer ce sulfure dans le spectre solaire entre les raies prismatiques H et I pour voir se produire une belle lumière verte, alors qu'elle ne persiste pas dans la chambre noire, tandis que si le sulfure est placé entre les raies G et H ou au delà de I, il acquiert une phosphorescence de même nuance, mais persistante. Ainsi il se produit une émission de rayons de même nuance, mais de durée inégale, quand le même corps est excité par des rayons de diverse longueur d'onde. Il est possible qu'il se manifeste simultanément des effets analogues lors de l'action de la lumière blanche sur certains corps et que par ce fait la loi de l'extinction lumineuse de ces corps se trouve plus compliquée.

On pourrait peut-être arriver à démontrer s'il en est réellement ainsi, en éclairant successivement un même corps, dans le phosphoroscope, à l'aide des différents rayons du spectre, et en déterminant dans chaque cas la valeur du coefficient $a$; c'est un point que je compte éclaircir. Je n'ai fait d'expériences sur ce sujet qu'à l'aide d'un cristal de nitrate d'urane, en plaçant devant le phosphorocospe un verre bleu foncé, ou bien en ne mettant pas d'écran, et j'ai obtenu à l'aide de deux séries d'expériences la même valeur de $a$; mais il est nécessaire d'opérer avec les diverses parties du spectre.

Il était important de mesurer directement l'intensité de la lumière émise par les différents sulfures alcalino-terreux. Le photomètre fig. 3 ne peut plus servir pour comparer les lueurs émises par les corps très-faiblement lumineux qui sont visibles pendant plusieurs heures dans l'obscurité. Pour pouvoir suivre l'émission de la lumière dans cette circonstance, le procédé le plus précis consiste à fixer, à l'aide de gomme arabique, les substances préalablement réduites en poussière sur un écran en carton de 1 décimètre de hauteur sur 5 de largeur, et à placer cet écran en contact avec une feuille mince de papier blanc de même grandeur et qui peut être éclairée par transparence au moyen d'une source lumineuse mise par derrière. Ces deux surfaces sont placées sur un écran suffisamment grand et noirci de façon que l'observateur, qui se trouve dans une chambre noire, peut juger de l'égalité de leur éclairement. La source lumineuse qui m'a le mieux réussi est une lampe à mèche plate, dont le support ou la boîte est noircie tout autour de la flamme, et qui peut recevoir des verres colorés à la partie antérieure afin de donner à la lumière la même couleur que celle du corps lumineux que l'on étudie. Cette lampe peut glisser sur une poutre de 4 mètres de longueur portant une règle divisée par millimètres, de façon à faire connaître exactement la position de la lampe par rapport à celle de l'écran en papier éclairé par transparence. Au moyen de cette disposition et à l'aide d'écrans convenablement placés, l'opérateur ne reçoit de lumière que celle qui est émise par les deux surfaces, l'une éclairée par transparence, l'autre par le corps en vertu de son action propre; s'il examine en outre les deux surfaces à l'aide d'un cylindre creux en carton noirci intérieurement, il ne reçoit aucune trace de lumière étrangère pouvant entraver la comparaison des intensités lumineuses.

On peut suivre avec cet appareil, qui donne directement l'intensité

lumineuse de la matière phosphorescente, la lumière émise par certaines substances impressionnables jusqu'à $1^h\ 30^m$ après l'insolation; au delà, les différences ne sont plus mesurables, et cependant on voit encore les matières pendant plus de 36 heures. Au moyen de cette disposition, quand la source lumineuse est à 200 centimètres de l'écran, une variation de 2 centimètres dans sa position donne une différence sensible dans l'intensité lumineuse des deux surfaces comparées; cette variation correspond à une différence $\frac{4}{200}$ ou $\frac{1}{50}$. Si la position de la source varie de 4 centimètres ou bien si l'on a une variation de $\frac{1}{25}$. dans l'intensité lumineuse de l'image éclairée par la source, le changement d'intensité des deux images que l'on compare est très-appréciable. Ainsi la fraction $\frac{1}{50}$ donne la limite à laquelle on peut arriver lors de la comparaison des intensités lumineuses et lorsque celles-ci ne sont ni trop vives ni trop faibles.

Quand on fait usage de ce mode d'expérimentation, il faut placer des écrans en verre coloré devant la source lumineuse, ainsi qu'on l'a dit plus haut, afin que les surfaces éclairées aient la même teinte; cela est nécessaire pendant les premières minutes de l'observation des sulfures alcalino-terreux, mais 5 ou 10 minutes après l'insolation, suivant les corps, toute nuance est impossible à apprécier, bien que l'on puisse continuer pendant longtemps à comparer les intensités lumineuses.

Ce dernier résultat est très-curieux à noter, car il semble qu'à mesure que les intensités lumineuses s'affaiblissent, les traces de lumière que l'on perçoit, quelle que soit leur couleur, tournent toutes à la teinte grise.

J'ai opéré successivement avec les principaux sulfures dont le mode de préparation a été donné dans le chapitre Ier. Les deux tableaux rapportés ci-après, comme exemples, renferment dans la première colonne les intensités lumineuses de la surface éclairée et par conséquent du sulfure. Ces intensités sont calculées en supposant qu'elles sont en raison inverse du carré des distances de la lampe à l'écran translucide, celle qui sert de point de départ étant prise pour unité.

Ces distances sont mesurées sur la poutre portant une règle en cuivre de 4 mètres de longueur et divisée par millimètres. Dans plusieurs expérien-

ces, ces distances dépassent 4 mètres; mais voici comment on les a obtenues : on a mis en avant de la lampe un écran de verre coloré absorbant la lumière sans changer sa nuance, et l'on a opéré rapidement de façon à avoir successivement deux évaluations de l'intensité lumineuse, l'une avec la lampe sans l'écran de verre, l'autre avec l'écran. Ainsi, dans l'expérience avec le sulfure vert de strontium, dont les résultats sont compris au 2e tableau, après $29^m$ $30^s$, la distance de la lampe sur la règle divisée était $385^c,70$; après avoir mis l'écran absorbant, 30 secondes ensuite, il a fallu rapprocher la lampe jusqu'à $159^c,25$; or, d'après l'expérience, comme on connaît, la loi d'extinction pendant ces 30 secondes, on peut calculer la distance réelle à laquelle il aurait fallu placer la lampe pour donner sans absorption la même intensité que la lumière de la substance phosphorescente; cette distance est $389^c,25$. Il ne reste plus ensuite qu'à déduire les autres valeurs d'après les nombres qui suivent le nombre $159^c,25$, et d'après ce second point de départ l'on peut ainsi plus que doubler les distances que l'on mesure sur la règle divisée et aller jusqu'à 10 mètres pour la distance de la lampe à l'écran.

Quand on opère, on a soin d'éclairer avec la lumière solaire la surface phosphorescente; puis, à différentes reprises, on ferme l'ouverture du volet de la chambre noire par où vient le faisceau de rayons solaires, et l'on voit si au moment de la fermeture la lumière émise est de même intensité que celle de l'écran éclairé par transparence au moyen de la lampe placée plus ou moins près. Quand on a atteint ce point, on ferme tout à fait la chambre noire, puis on détermine de temps à autre à quelle distance il faut placer la lampe pour avoir l'égalité d'illumination des surfaces éclairées. On ne peut, au commencement de l'expérience, avoir une grande exactitude, surtout en raison de la difficulté de rendre la teinte de la lumière artificielle la même que celle de la lumière émise par phosphorescence; mais après la première détermination, les évaluations se font avec exactitude, comme le prouvent les expériences successives faites avec la même matière. Du reste, après quelques minutes, on peut suivre, même pendant longtemps, la diminution dans l'intensité lumineuse, mais les nuances des lumières émises par les différents corps sont impossibles à distinguer.

A côté de la colonne des intensités se trouvent les temps au moment des observations et le produit de ces deux quantités. Je me bornerai

à citer quelques-uns des résultats obtenus avec le sulfure de calcium lumineux bleu, et le sulfure de strontium lumineux vert (1).

Avec le sulfure de calcium phosphorescent bleu-vif, on a eu :

| Intensité *i*. | Temps *t*. | Produit *it*. |
|---|---|---|
| 1 | 0″ | 0 |
| 0,076300 | 35 | 2,6700 |
| 0,034880 | 75 | 2,6160 |
| 0,026752 | 125 | 2,3440 |
| 0,017899 | 170 | 3,0430 |
| 0,011744 | 265 | 3,1122 |
| 0,007765 | 420 | 3,2614 |
| 0,006280 | 545 | 3,4220 |
| 0,004582 | 700 | 3,2078 |
| 0,003084 | 930 | 2,8683 |
| 0,002586 | 1110 | 2,8700 |
| 0,001996 | 1305 | 2.6056 |
| 0,001736 | 1525 | 5,6476 |
| 0,001488 | 1725 | 2,5668 |

Au delà de 28′ 25″ ou 1725″ les observations ne peuvent plus se continuer vu la faiblesse de la lumière émise.

Avec le sulfure de strontium lumineux vert, on a eu :

| Intensité *i*. | Temps *t*. | Produit *it*. |
|---|---|---|
| 1 | 0″ | 0 |
| 0,028442 | 37 | 1,0523 |
| 0,010436 | 92 | 0,9601 |
| 0,006887 | 132 | 0,9091 |
| 0,003798 | 210 | 0,7976 |
| 0,002620 | 312 | 0,8174 |
| 0,001826 | 470 | 0,8562 |
| 0,001383 | 615 | 0,8507 |
| 0,000932 | 820 | 0,7643 |

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 62.

| Intensité *i*. | Temps *t*. | Produit *it*. |
|---|---|---|
| 0,000726 | 1005 | 0,7296 |
| 0,000609 | 1255 | 0,7643 |
| 0,000494 | 1515 | 0,7484 |
| 0,000338 | 1770 | 0,5997 |
| 0,000332 | 1800 | 0,5997 |
| 0,000220 | 2480 | 0,5471 |
| 0,000159 | 3180 | 0,5066 |
| 0,000117 | 4135 | 0,4850 |
| 0,000099 | 4780 | 0,4727 |

Au delà de 80 minutes ou 4780″ les teintes sont impossibles à comparer.

On reconnaît à l'inspection de ces tableaux que le produit de l'intensité de la lumière émise par le temps ne varie que dans des limites qui ne sont pas très-écartées; avec le phosphore qui se conserve le plus longtemps lumineux, le sulfure bleu de calcium, ce produit n'augmente pas de plus de $\frac{1}{3}$ de sa valeur et présente un maximum après un temps de $9^m$ 5″. Avec le sulfure de strontium lumineux vert ce produit ne change que dans les limites de 1 à 2, alors que le temps varie de 0 à 4780 secondes. D'autres expériences, dont on ne rapporte pas ici les résultats, ont montré que les sulfures qui s'éteignent plus rapidement, comme le sulfure de calcium lumineux jaune, donnent pour ce produit un nombre qui diminue à mesure que le temps augmente. On a trouvé que les expériences diverses faites avec le même corps ne donnent pas pour le produit *it* un maximum au bout du même temps; mais comme l'intensité lumineuse qui sert d'unité varie dans chaque circonstance et dépend du degré d'activité de la substance et de l'intensité de la source qui sert de terme de comparaison, cette différence provenant du point de départ de l'expérience suffit pour expliquer les divers effets que l'on obtient.

On peut conclure de l'ensemble des différents résultats obtenus que lors de l'insolation des substances dont la persistance des impressions lumineuses est de longue durée, la loi de déperdition de la lumière n'est plus la même que celle des corps dont la persistance est courte, et cela très-vraisemblablement en raison de l'émission simultanée de rayons d'inégale durée. Je ne pense pas qu'elle puisse être repré-

sentée simplement d'une manière exacte par une formule ; mais pour avoir une idée de la vitesse avec laquelle l'extinction de la lumière a lieu, on peut supposer qu'entre certaines limites la formule empirique

$$i^m(c+t)=c$$

peut s'appliquer; alors, d'après cette expression, la vitesse V de déperdition de la lumière serait :

$$V=\frac{di}{dt}=-\frac{i^{m+1}}{mc},$$

en supposant que l'intensité lumineuse au commencement de l'extinction soit prise pour unité.

Cette vitesse serait donc proportionnelle au rapport de $\frac{1}{m}$ et à la puissance $m+1$ de l'intensité de la lumière émise. Comme $m$, d'après les expériences, est compris entre $\frac{1}{2}$ et 1, $m+1$ se trouve compris entre $\frac{3}{2}$ et 2, et la vitesse d'extinction ne varierait pas tout à fait comme le carré de l'intensité lumineuse, mais plus vite que proportionnellement à cette intensité. Ce résultat indique que les corps qui ont une persistance de courte durée n'ont que des vitesses de déperdition proportionnelles à l'intensité, tandis que les corps à longue persistance donnent une vitesse d'extinction plus rapide ; on ne peut expliquer la longue durée pendant laquelle ils brillent que parce qu'ils reçoivent de la part de la lumière extérieure une plus grande somme d'action que les corps à persistance de faible durée.

On pourrait indiquer la vitesse de déperdition de la lumière par le tracé graphique de la courbe exprimant les relations qui existent entre le temps et l'intensité lumineuse, et par la recherche de la tangente à cette courbe. Mais la loi de déperdition n'étant pas simple, cette recherche ne m'a pas paru utile.

D'après la formule précédente, la quantité Q totale de lumière émise par le corps serait donnée par l'expression suivante :

$$Q=\int^{+\infty} i_0^m\left(\frac{c}{t+c}\right)^m dt=\frac{i_0^m\, mc}{1-m},$$

$i_0$ étant l'intensité lumineuse au commencement de l'observation. Mais, en raison des différences existant entre les nombres observés et ceux qui se déduisent du calcul, on ne peut songer à appliquer cette formule.

On a réuni dans le tableau suivant les valeurs de $c$ et de $m$ trouvées avec les sulfures alcalino-terreux, mais seulement à partir du moment où la formule exprime les résultats de l'expérience, c'est-à-dire après quelques minutes d'émission lumineuse.

| CORPS PHOSPHORESCENTS. | | LIMITES des observations. | VALEUR de l'exposant $m$. | VALEUR du coefficient $c$. |
|---|---|---|---|---|
| Sulfure de calcium rouge orangé..... | | De 0′ à 1′ | 0,500 | 12,40 |
| Sulfure de calcium jaune orangé..... | | De 0′ à 5′ | 0,806 | 1,84 |
| Sulfure de calcium lumineux vert. | 1re expér. | De 5′ à 30′ | 0,580 | 21,60 |
| | 2e expér. | De 5′ à 18′ | 0,700 | 20,60 |
| Sulfure de calcium lumineux bleu clair... | | De 7′ à 29′ | 0,800 | 9,53 |
| Sulfure de strontium lumineux vert. | 1re expér. | De 1′25″ à 20′ | 0,800 | 6,40 |
| | 2e expér. | De 8′ à 22′ | 0,800 | 4,50 |
| | 3e expér. | De 25′ à 80′ | 0,806 | 2,83 |
| Sulfure de strontium lumineux bleu violet. | 1re expér. | De 6′ à 10′ | 0,500 | 25,00 |
| | 2e expér. | De 2′ à 9′ | 0,500 | 28,00 |
| Sulfure de barium lumineux vert..... | | De 1′ à 24′ | 0,660 | 4,50 |

Dans toutes les expériences précédentes l'unité de temps est la seconde.

On n'arrive pas au même nombre pour l'expression de $m$ et de $c$ dans les diverses déterminations faites avec une même substance ; ce résultat peut tenir non-seulement à ce que l'intensité de la source lumineuse n'est pas restée la même dans chaque série d'observations, mais encore aux erreurs d'observation dues à la difficulté avec laquelle les intensités lumineuses sont déterminées.

Les résultats précédents permettent de montrer de quelle merveilleuse faculté l'organe de la vision est doué et quelles sont les plus faibles intensités lumineuses qu'il puisse comparer ainsi que celles qu'il

peut distinguer. Prenons pour exemple l'effet obtenu avec le sulfure de strontium lumineux vert :

L'intensité maximum de la lumière émise lorsque les rayons solaires frappent ce corps dans le phosphoroscope a donné, comparativement à la lumière émise par le phosphate d'urane, des rayons de même nuance, mais dont l'intensité est les 0,027 de cette dernière ; or, on a vu que le phosphate d'urane excité par les rayons solaires réfléchis donne une intensité lumineuse égale à 0,08 de la partie moyenne de la flamme d'une bougie : si donc on admet que la réflexion sur la surface métallique fasse perdre 0,30 de la lumière incidente, on voit que le sulfure de strontium, au moment où ayant été exposé à l'action des rayons solaires directs il est rentré dans l'obscurité, a un éclat qui est au maximum les 0,0031 de celui d'une bougie.

Or, on peut suivre dans l'obscurité la loi du décroissement de l'intensité lumineuse de ce corps pendant $1^h\ 19'\ 40''$ ou 4780 secondes, et la formule

$$i^{0,806}\,(t + 2,83) = 2,83$$

rend suffisamment compte de ce décroissement ; au delà on ne peut plus mesurer les intensités lumineuses, mais on peut encore voir la substance, qui continue à émettre de la lumière pendant longtemps ; au bout de 30 heures cette substance est encore visible, et sans doute on pourrait distinguer quelques traces de lumière après un temps plus long. Si l'on admet que la loi précédente s'applique encore à cet instant, on trouve que si après 4780 secondes l'intensité lumineuse mesurée est 0,0000989 de ce qu'elle était d'abord ou 0,000 000 31 par rapport à celle d'une bougie, après 30 heures cette intensité serait les 0,00000207 de l'intensité première ou 0,0000000067 de celle d'une bougie.

En supposant que l'éclat du soleil soit 50000 fois celui d'une bougie, et en prenant la lumière solaire pour unité, on voit que l'œil peut comparer des intensités lumineuses comprises entre des limites qui dépassent 1 et $10^{11}$, et que lorsqu'un observateur est placé dans l'obscurité pendant quelque temps, il peut saisir encore de faibles traces lumineuses dont l'intensité est inférieure à une fraction qui aurait pour numérateur l'unité, et pour dénominateur l'unité suivie de 13 zéros, c'est-à-dire $10^{13}$.

Ces résultats montrent combien on peut aller loin dans l'étude de la

lumière émise par les corps, même lorsque ces effets sont très-faibles, car l'organe de la vision, qui peut distinguer les différences les plus légères dans la composition de la lumière, est impressionnable entre des limites d'une étendue vraiment prodigieuse.

# CHAPITRE III.

## Réfrangibilité des rayons actifs; spectres phosphorogéniques. Action de la lumière électrique et des lumières artificielles.

### § 1. *Action des rayons de diverse réfrangibilité sur les substances phosphorescentes à la température ordinaire.*

#### *Sulfures phosphorescents.*

L'action des rayons de diverse réfrangibilité sur les substances phosphorescentes donne lieu à des effets très-remarquables. On reconnaît d'abord que les différentes parties du spectre solaire ne produisent pas des actions égales sur les substances impressionnables, et qu'il n'y a aucun rapport entre la couleur des rayons actifs et celle de la lumière émise. Pour vérifier ce fait, il suffit de prendre un fragment d'une matière très-phosphorescente, de le promener dans l'étendue d'un spectre très-concentré produit dans une chambre noire, puis d'examiner dans chacune de ses positions l'action lumineuse qui suit celle du rayonnement. On voit alors que ce fragment s'illumine dans les rayons les plus réfrangibles ou dans les rayons violets, qui sont les rayons les plus actifs, et qu'il brille suivant sa couleur propre; ainsi le sulfure de calcium orangé donne une lumière orangée, le sulfure vert donne une teinte verte, etc.... Les recherches faites dans le siècle dernier, et dont on a parlé dans le livre I^er^, page 26, ont mis ce fait en évidence. Il y a plus, une partie du rayonnement lumineux détruit la phosphorescence produite, comme on l'a déjà indiqué pages 32 et 144, ou, en d'autres termes, détruit la modification acquise

dans la partie la plus réfrangible du spectre. Cet effet, comme je l'ai démontré et ainsi qu'on le verra plus loin, se manifeste depuis le bleu jusqu'au delà du rouge, c'est-à-dire dans la plus grande étendue de la partie visible de l'image prismatique et même au-delà (1).

Le mode d'expérimentation précédent ne peut permettre une détermination exacte des parties où les effets de lumière se produisent; je je me suis servi alors d'un procédé qui est principalement applicable aux sulfures : il consiste à réduire en poudre fine les substances phosphorescentes et à faire tomber cette poudre à l'aide d'un tamis de soie sur un carton enduit d'une très-légère couche de gomme arabique. Au bout de peu de temps la matière est sèche, et l'on a une surface homogène qui est phosphorescente, et qui peut servir aux expériences sur les actions du spectre; elle conserve même pendant longtemps cette propriété, car la gomme qui entoure le sulfure empêche ce dernier de s'altérer à l'air humide. Le sulfure vert de strontium, particulièrement, se conserve ainsi pendant plusieurs années; les sulfures de barium et de calcium s'altèrent plus vite; quant au sulfure de zinc (blende hexagonale), il ne peut subir aucune altération. Cette surface n'est pas aussi lumineuse que les substances en masse; cela tient à l'état de division des parties : mais en ayant soin d'opérer après que l'on est resté quelque temps dans l'obscurité, les effets lumineux sont suffisamment nets.

Pour agir avec un spectre lumineux, il faut que celui-ci ait une intensité suffisante pour permettre de bien apprécier les différents effets produits. On reçoit alors un faisceau de rayons solaires sur le miroir d'un héliostat, et on l'introduit dans l'intérieur de la chambre obscure par une ouverture de 1 à 2 millimètres de largeur sur 4 à 5 centimètres de hauteur; ce faisceau étant reçu sur un prisme de flint blanc dans la position du minimum de déviation, une lentille de 40 centimètres de foyer est placée de façon à donner un petit spectre très-concentré et très-lumineux, mais présentant nettement les raies noires; on peut avoir ainsi un spectre de 5 à 6 millimètres de largeur sur 4 à 5 centimètres de longueur, depuis la raie A du rouge jusqu'à la double raie H de l'extrême violet. C'est avec un spectre de cette étendue que l'on a opéré quand les substances ne sont pas très-phospho-

(1) *Constitution du spectre solaire, Biblioth. univ. de Genève,* 3e série, t. 40, p. 341 (1842). — *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 9, p. 314 (1843). — *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 22, p. 244 (1848). — *Archives du muséum de Paris,* 1839.

rescentes; quand elles sont vivement impressionnables, on peut agrandir le spectre et opérer avec une image prismatique de 8 à 10 centimètres de longueur sur 1 centimètre de largeur.

Le mode d'expérimentation est très-simple : l'observateur, qui s'est tenu à l'obscurité depuis un quart d'heure ou vingt minutes, ouvre ou ferme lui-même l'ouverture du volet de la chambre noire; il faut qu'il soit placé de façon à ce que, ayant tenu les yeux fermés pendant que le spectre a agi durant l'espace de quelques secondes sur une surface enduite de matière phosphorescente, il examine la surface immédiatement après avoir fermé l'ouverture du volet : il voit alors quelles sont les parties qui sont devenues lumineuses après l'action du spectre. S'il veut connaître les espaces lumineux et leur position par rapport aux raies, il marque avec un crayon leurs limites, la position du maximum, etc., puis à la fin de l'expérience il trace également sur le papier la position des raies du spectre lumineux.

D'après ce mode d'expérimentation, on reconnaît trois genres d'effets produits sur les surfaces ainsi enduites de matières lumineuses, et pour bien étudier ces effets il faut opérer avec des sulfures de calcium, de strontium ou de barium lumineux verts, et préparés avec les carbonates de ces métaux, comme on l'a dit plus haut.

1°. On observe après l'action du rayonnement que certaines parties sont devenues lumineuses avec une nuance qui est la nuance propre émise par la substance phosphorescente; mais, ainsi qu'on le verra plus loin, les parties du spectre dans lesquelles les effets sont observés varient en général avec les substances, et ne dépassent guère la raie F du bleu en remontant vers le rouge. Ces effets, qui vont en diminuant à mesure que l'on s'éloigne du moment où l'action du rayonnement a eu lieu, et qui durent plusieurs minutes pour certaines matières et plusieurs heures au moins pour d'autres, sont les effets de phosphorescence proprement dits.

2°. Si l'on impressionne à la lumière diffuse ou solaire toute la surface et que l'on vienne à y projeter rapidement un spectre très-intense, au bout de plusieurs secondes en fermant l'ouverture du volet et en examinant la surface, on trouve qu'elle est restée lumineuse, excepté à l'endroit frappé par le spectre, et que dans les parties les plus réfrangibles, où le rayonnement excite la phosphorescence, l'intensité de la lumière émise a augmenté; mais depuis cette dernière partie jusque bien au delà du rouge, et dans toute la région frappée par les rayons

les moins réfrangibles, la surface est devenue complétement obscure. Cet effet prouve que cette partie du spectre détruit la phosphorescence. Mais cette destruction, comme je l'ai montré (1), ne se produit pas en rendant immédiatement obscure la matière phosphorescente, et si l'on fait usage de substances éminemment lumineuses, que l'on opère rapidement et que le spectre n'agisse que pendant une fraction de seconde ou même une seconde, toute la partie frappée par le spectre depuis l'extrême rouge jusqu'au delà du violet paraît lumineuse ; ce n'est donc qu'en prolongeant l'action du spectre pendant plusieurs secondes que la partie la moins réfrangible est devenue obscure. Ce fait n'a pu être observé avec les matières faiblement phosphorescentes, mais l'analogie d'effets porte à croire que l'action a lieu également sur ces corps aussi bien que sur les phosphores très-impressionnables.

Ces résultats prouvent que des rayons qui détruisent la phosphorescence agissent à la manière de la chaleur ainsi qu'on l'a vu, livre III, p. 52, et font rendre aux corps lumineux pendant un espace de temps de courte durée toute la somme de lumière qu'ils auraient émise plus lentement dans l'obscurité.

3°. Un troisième genre d'effets a lieu lors de l'action du spectre sur les matières phosphorescentes, et principalement sur les sulfures de strontium, de barium et de calcium. Je l'ai observé il y a plus de vingt ans, et voici comment il se trouve rapporté dans l'un des premiers mémoires faits sur ce sujet, en 1843 : « Un fait que j'ai souvent observé dans le cours de ces expériences, c'est que lorsque le spectre solaire frappe une substance telle que le sulfure de calcium phosphorescent, pendant son action le papier sur lequel est déposée cette substance paraît lumineux non-seulement de A en H, mais encore jusqu'en P, de sorte qu'on peut voir toutes les raies du spectre de A en P dessinées par projection (2). »

J'ai attribué ce phénomène à un effet de phosphorescence à l'époque où je l'observai ; depuis, il avait été nommé effet de fluorescence et rapporté par M. Stockes à un changement dans la vitesse de vibration des rayons lumineux très-réfrangibles après que ces derniers ont frappé la surface des corps (3). Ce physicien a observé ces effets avec des corps qui ne donnent pas de phosphorescence quand on

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 22, p. 344.
(2) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 320 (1843).
(3) *Ann. de chimie et de physique*, t. 38, p. 491.

cpère par les procédés ordinaires, et parmi lesquels on peut citer, comme on le sait, le bisulfate de quinine, le verre d'urane, une dissolution alcoolique de chlorophylle, etc. Nous verrons dans le paragraphe suivant que les matières qui présentent ces effets ne sont que des substances phosphorescentes vivement lumineuses dans les premiers instants qui suivent l'action de la lumière ou bien à l'instant où celle-ci agit.

Un fait qui vient à l'appui de cette explication, c'est qu'avec les différentes matières phosphorescentes le phénomène dont il s'agit donne une lumière de même nuance que la phosphorescence de longue persistance.

Les expériences de M. Stockes ont montré que ces effets lumineux produits par l'action des rayons de diverse réfrangibilité sur les corps, comme le bi-sulfate de quinine, le verre d'urane, etc.., donnent toujours lieu à une émission de lumière de moindre réfrangibilité, ou d'une plus grande longueur d'ondulation que les rayons actifs. Mais c'est ce qui résulte également des effets de phosphorescence ordinaire, sauf lorsque l'on observe les actions des rayons les moins réfrangibles comprises dans le 2$^{me}$ genre d'effets cités page 300; en effet, dans les rayons rouges, par exemple, on observe une émission de lumière de la nuance de celle qui est donnée par la matière lumineuse, verte ou bleue, et par conséquent d'une réfrangibilité plus grande. D'un autre côté, lors de l'action du spectre sur le sulfure de calcium, qui luit avec une teinte bleu violacé, la phosphorescence donne une lumière de même nuance que la partie active du spectre, et la matière offre l'exemple remarquable d'une substance impressionnable dont les vibrations sont pour ainsi dire à l'unisson des vibrations qui l'influencent.

En général la lumière émise par un sulfure phophorescent est d'une seule teinte, quelle que soit la réfrangibilité des rayons actifs et la couleur de la lumière émise, et, sauf quelques exceptions, ne correspond pas à celle de ces derniers; cependant j'ai trouvé trois préparations qui font exception à cette règle, et qui offrent deux teintes différentes suivant la partie du spectre qui les impressionne :

1°. Le sulfure de barium, obtenu lors de la réduction du sulfate de baryte par le noir de fumée, et phosphorescent jaune orangé, est lumineux jaune par l'action des rayons situés depuis H jusqu'en P; mais lorsque cette même substance est influencée par les rayons violets et bleu-indigo de F en H, la teinte émise par la même matière est plus rougeâtre.

2°. Le sulfure de calcium lumineux rouge-orangé provenant de la calcination des coquilles d'huîtres, et qui donne une lumière rouge lorsqu'il est impressionné depuis le bleu F jusque bien au delà du violet en O, présente une trace de nuance verte quand la partie active du spectre est comprise entre O et P. Avec ce corps, on aurait pu attribuer l'effet produit à un mélange de deux sulfures phosphorescents, mais les teintes présentées par la substance précédente et par celle qui suit ne peuvent être attribuées à une action de ce genre.

3°. La matière obtenue dans la réaction du sulfure de potassium sur les coquilles d'huîtres calcinées et sur la chaux dans certaines circonstances (*voir* page 226) est lumineuse violette indigo dans la partie du spectre qui présente la même teinte ; mais au delà du violet la couleur émise est bleue. J'insiste sur ce fait, car avec cette substance les vibrations sont à l'unisson de celles des parties actives de la lumière, ce qui n'a pas lieu ordinairement puisqu'en général les vibrations des corps phosphorescents sont moins rapides ou ont une longueur d'onde plus grande que celle des rayons actifs.

Actuellement, examinons quels sont les effets obtenus quand on opère successivement avec les différentes préparations de sulfures décrites dans le chapitre 1er et prises comme types. Le mode d'expérimentation ayant été indiqué, on n'y reviendra pas ; je ferai remarquer seulement que les effets des rayons agissant pour détruire la phosphorescence n'ont été étudiés qu'avec les matières les plus lumineuses, et que dans les figures qui sont représentées ci-contre l'on a admis la même limite extrême du côté du rouge pour tous les composés. Cela n'est peut-être pas rigoureusement exact ; mais puisque les trois sulfures de strontium, de barium et de calcium les plus lumineux ont présenté cet effet ainsi que le sulfure de zinc, il est permis de supposer qu'il a également lieu dans la plupart des cas. Si l'on veut reconnaître nettement cette action des rayons, que l'on pourrait nommer rayons négatifs, il suffit, après l'action du spectre, d'élever la température du carton ou de la surface enduite de matière phosphorescente, et la partie sur laquelle la destruction de la phosphorescence a eu lieu reste obscure, alors que tout autour la surface devient lumineuse par la chaleur. Dans le livre IV, page 144, à propos de l'analyse de la lumière, on a déjà parlé de ces effets.

La *Planche* figure 32, annexée à cet ouvrage, donne la limite des effets de production et de destruction de la phosphorescence sur les sulfures al-

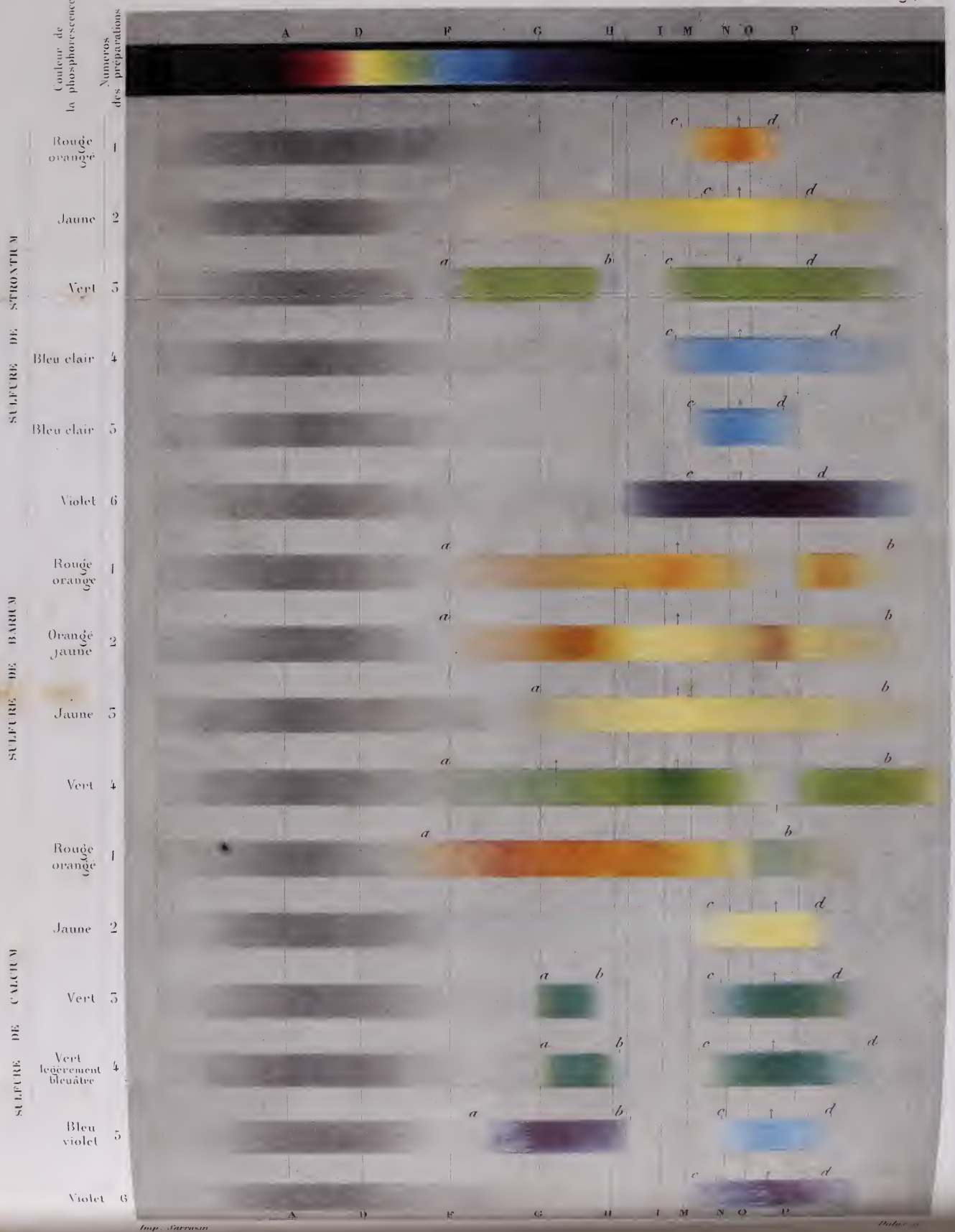
calino-terreux. Il y a un point sur lequel on doit encore appeler l'attention avant de donner la description des effets produits : on a supposé que la limite de la partie la moins réfrangible des rayons actifs bleus et violets était la même que celle de la partie la plus réfrangible des rayons rouges jaunes et verts qui agissent pour détruire la lumière; mais si cela peut avoir lieu dans quelques cas, le contraire peut se présenter, comme le prouve l'action exercée sur le sulfure de barium lumineux vert. Avec cette matière, ainsi qu'on l'indique sur le n° 4 de la planche, on trouve qu'en opérant de manière à produire la phosphorescence, les rayons actifs s'étendent presque jusqu'en F; mais si l'on impressionne toute la surface et qu'on cherche quelle est l'action destructive exercée par les rayons les moins réfrangibles, on observe que la partie obscure s'étend depuis le rouge, et même au delà, jusqu'en F vers le bleu indigo ou près de la raie G. Ainsi, suivant la manière d'opérer, la même partie du spectre FG produit ou détruit la phosphorescence, et les limites de ces deux genres d'actions ne sont pas les mêmes et empiètent l'une sur l'autre. La partie FG du spectre fait donc fonction de modérateur; elle rend lumineuse la substance qui ne l'est pas, mais celle-ci ne peut dépasser un certain degré au delà duquel les rayons agissent pour diminuer la lumière émise. D'autres sulfures ont également présenté cet effet; mais pour les observer il est nécessaire de se servir de matières très-lumineuses, sans cela le phénomène est assez difficile à distinguer.

Dans les figures, j'ai donc pris comme limites celles des rayons qui excitent la phosphorescence, et j'ai supposé que les rayons qui la détruisent commencent dans les parties qui sont immédiatement voisines. Les parties du spectres qui comprennent ces derniers rayons sont seulement représentées en noir; celles relatives aux rayons excitateur sont colorées avec les nuances des couleurs de phosphorescence.

Le spectre solaire lumineux représenté en haut de la planche fig. 32 avec ses principales raies donne les parties correspondantes où les effets de phosphorescence ont lieu. On a figuré dans la partie infra-rouge la place où se trouve l'espace inactif cité livre IV, page 144.

Les six premières images de spectres du n° 1 au n° 6 se rapportent aux expériences faites avec les six principaux types de sulfure de strontium phosphorescent citées page 236 ; avec toutes ces préparations, sauf les n$^{os}$ 2 et 3, les effets de phosphorescence sont produits par les rayons situés au delà du violet, et le maximum d'action se trouve entre les

Fig. 32




Imp. Sarrazin

raies N et O. La préparation n° 2, faite avec la strontiane caustique et le soufre chauffés au-dessous de 500 degrés, et lumineuse jaune, donne une action assez vive en M et P, mais qui se prolonge en s'affaiblissant beaucoup jusque vers F.

Avec la préparation n° 3, obtenue par la réaction du soufre sur certains carbonates de strontiane, et qui est la plus lumineuse des sulfures de strontium, il y a deux maxima d'action : le premier vers G, l'autre entre O et N ; on obtient donc deux taches lumineuses, l'une comprise entre F et H, l'autre depuis I jusqu'au delà de P, l'intervalle HI restant obscur. Cette préparation met en évidence un fait assez curieux, relatif à la phosphorescence ne durant que pendant un temps très-court : lorsque cette préparation est faite de façon à ce que sa couleur propre par diffusion à la lumière du jour soit jaune soufre (*voir* page 234), elle donne une belle phosphorescence verte, mais en outre elle produit, pendant l'action du spectre, une très-belle lumière de même nuance entre G et P, et même entre H et I dans une région où la phosphorescence après l'insolation n'est pas appréciable. Si cette même substance est calcinée davantage, elle prend de plus en plus de la compacité, elle perd sa teinte propre vue par diffusion ; et quoique restant impressionnable entre les mêmes limites, donnant lieu à deux maxima d'action, et présentant la même nuance verte par phosphorescence, elle devient de moins en moins lumineuse pendant l'action des rayons situés entre H et I, et peut même cesser complétement de présenter cet effet. Ce résultat montre que l'arrangement moléculaire qui influe sur les effets lumineux pendant l'action des rayons, c'est-à-dire sur les effets de phosphorescence à courte durée, et qui donne lieu à la couleur de la matière vue par diffusion, est indépendant de celui qui produit la phosphorescence proprement dite ou l'émission lumineuse de longue durée. Cet effet est à signaler, et l'on verra plus loin qu'on l'observe également avec d'autres substances ; il prouve que l'action de rayons solaires de diverse réfrangibilité peut exciter des vibrations de même vitesse dans un corps phosphorescent, les unes se conservant pendant un temps assez long, les autres pendant un temps beaucoup plus court.

La préparation n° 1, obtenue, comme on l'a dit, avec le sulfure d'antimoine, donne une très-belle lumière jaune orangé de G en I même sous l'influence des rayons actifs, et en examinant la substance pendant l'action du spectre, quand il tombe sur la surface enduite de cette matière, on voit la teinte du violet du spectre lumineux passer au rouge.

La préparation n° 2 donne également de G en I, pendant l'action des rayons, une lumière de même nuance que la phosphorescence observée après la fermeture du volet de la chambre noire, et la couleur du violet du spectre tourne également au rouge.

La préparation n° 4, obtenue au moyen du soufre et du carbonate de strontiane dans certaines conditions, présente, sous l'influence des rayons actifs, un faible effet lumineux de même teinte bleuâtre que la phosphorescence; de plus, une traînée de lumière se prolonge assez loin au delà de P.

La préparation n° 5, qui est obtenue par la réduction des cristaux de sulfate de strontiane au moyen du charbon, et qui donne la même phosphorescence bleuâtre, présente à peine de faibles traces de lumière dans les conditions que l'on vient d'indiquer; il en est de même du n° 6.

On voit donc qu'en général ces composés présentent des effets de phosphorescence à très-courte durée et plus ou moins forts, indépendants de la phosphorescence de longue durée, mais de même teinte que cette dernière.

Les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, sur les figures, indiquent les limites des parties où la phosphorescence est produite. Les flèches marquent la position du maximum d'action, et les traits en face des lettres *a*, *b*, *c*, *d*, les parties où l'action lumineuse commence à décroître rapidement. On voit, d'après ces limites, que c'est à peu près dans les mêmes parties du spectre que la phosphorescence est généralement excitée, si ce n'est lorsqu'on observe deux maxima d'action. Mais il arrive alors, comme avec le sulfure de calcium, que le deuxième maximum, ou le plus réfrangible, est situé dans la partie *cd* du spectre qui influence même les composés de strontium faiblement lumineux, et représente, pour ainsi dire, la partie la plus stable de la portion excitatrice du spectre; le premier maximum, placé dans la partie excitatrice *ab*, ne s'est présenté accidentellement qu'avec le phosphore lumineux vert.

Quant aux parties du rayonnement où la destruction de la phosphorescence a lieu, elles sont comprises en général dans la portion visible du spectre et même au delà; la région où l'action est la plus énergique, et où la tache noire sur les surfaces lumineuses commence à paraître, est placée dans l'orangé entre les lignes A et D. On a supposé la même limite du côté le moins réfrangible, ce qui est sensiblement vrai avec les différents sulfures; mais la limite la plus réfrangible peut varier de position, comme on l'a dit antérieurement.

On a vu livre IV, page 144, comment à l'aide de ces phénomènes j'avais pu distinguer quelques bandes inactives en deçà du rouge, c'est-à-dire dans la partie infra-rouge; une de ces bandes est seulement indiquée en haut de la planche; on la suppose la même dans toutes les figures.

Les quatre images spectrales qui suivent les précédentes expriment les effets observés quand le spectre solaire agit sur des surfaces enduites de sulfure de barium phosphorescent; comme avec le sulfure de strontium, les n$^{os}$ 1, 2, 3, 4 correspondent aux numéros des préparations citées page 239.

Quand on examine l'ensemble de ces figures, on est de suite conduit à cette remarque, que ces diverses préparations n'offrent toutes qu'un seul maximum d'action bien manifeste pour les rayons qui excitent la phosphorescence, maximum qui est situé entre les raies M et I, à la place indiquée par les petites flèches.

La trace lumineuse qui résulte de l'action des rayons actifs s'étend en général depuis F jusque bien au delà de P. Avec la préparation n° 1, lumineuse rouge orangé, il y a diminution de lumière de P en O, mais sans limite tranchée comme lorsqu'il s'agit des sulfures de strontium et de calcium, pour lesquels les parties actives du spectre sont nettement séparées par des bandes obscures. Entre H et G il y a seulement indice d'une diminution du même genre.

Avec la préparation n° 2 phosphorescente jaune d'or, la trace lumineuse due à l'action du rayonnement s'étend également depuis F jusque bien au delà de P; mais avec le sulfure provenant de la réduction du sulfate de baryte naturel la teinte de la lumière émise n'est pas la même de F en H ou de H en P. De F en H elle tourne au rouge, et de H en P elle reste jaune. Quand la matière a été obtenue par le carbonate provenant de l'acétate de baryte traité par le carbonate de soude, entre O et P la lumière diminue d'intensité comme avec la préparation n° 1; mais à côté de H, entre H et G, il y a encore un indice bien net d'une diminution d'effet, de sorte qu'il y a deux maxima et deux minima d'action bien manifestes, l'un entre H et G donnant une teinte orangée, l'autre entre M et I donnant une teinte jaune. Au delà de N se trouve une traînée lumineuse, qui présenterait un troisième maximum si elle était plus forte. Entre H et I et entre M et N sont les deux minima. Entre M et N la teinte est même un peu rougeâtre, suivant les échantillons préparés.

On doit noter en outre que si l'on examine la surface pendant l'action lumineuse des rayons incidents, entre H et G la partie du spectre paraît violette rose.

La préparation n° 3, obtenue par l'action du soufre sur la baryte caustique, donne un maximum d'action entre M et I à la même place que les préparations précédentes; l'étendue de la partie lumineuse ne remonte pas au delà de G, peut-être en raison de la faible impressionnabilité de la matière, mais elle se prolonge au delà de P, comme avec les autres préparations.

Le n° 4, obtenu par la réaction du soufre sur le carbonate de baryte, et qui est lumineux vert jaunâtre, est avec le n° 2 un des composés de barium qui par phosphorescence donne la lumière la plus vive. L'action excitatrice s'étend jusque près de F et va bien au delà de P. Le maximum d'action a lieu également entre les raies I et M; mais entre O et P il semble que la surface phosphorescente soit un peu moins lumineuse que de chaque côté, en sorte qu'il y a une apparence de minimum d'action; entre H et G à peine s'il y a trace d'une diminution d'effet du même genre. Avec cette matière, il est facile d'observer les effets des rayons qui excitent la phosphorescence et de ceux qui la détruisent; on trouve alors que les limites des deux actions ne sont pas représentées par une seule et même ligne, mais qu'elles empiètent l'une sur l'autre entre *a* et *f*, comme il a été dit plus haut.

Ces différentes préparations du sulfure de barium, et surtout les deux premières, offrent d'une manière très-remarquable les effets de phosphorescence à période très-courte; la lumière émise, comme avec toutes les autres substances, est de même teinte que celle qui est produite lors de la phosphorescence de longue durée. De G en H la teinte des couleurs prismatiques change même et tourne au rouge; au delà la couleur de la lumière émise est la même que celle de la phosphorescence. Ce sont, du reste, ces sulfures de barium et quelques préparations de strontium qui présentent le plus énergiquement le phénomène de phosphorescence à très-courte durée. Le sulfure de calcium, comme on va le voir, peut présenter également des effets du même genre, mais d'une manière moins marquée.

On n'a pas représenté sur la planche fig. 32 l'effet produit avec le sulfure de barium obtenu par la réaction du persulfure de potassium sur la baryte et sur d'autres préparations; en général, l'action s'étend jusqu'en F et va bien au delà de P. Quoique les limites des parties actives du

spectre soient un peu plus différentes que sur les substances précédentes, les différences sont de l'ordre de grandeur de celles que l'on observe avec celles-ci ; d'un autre côté, les effets de phosphorescence à courte période ont été peu marqués.

Les images spectrales qui viennent après celles-ci sont relatives à l'action exercée par le spectre solaire sur les principales préparations de sulfure de calcium qui sont mentionnées page 231. Il y a plus de différence entre les effets obtenus qu'en faisant usage des sulfures précédents, et l'action dans la partie lumineuse ne paraît pas dépasser G, si ce n'est avec les préparations n$^{os}$ 1 et 5. Trois des préparations offrent une seule trace lumineuse : ce sont les préparations 1, 2, 6, lumineuses rouge, jaune et violet; les trois autres, qui brillent avec les teintes verte, verte-bleuâtre et indigo, offrent deux traces lumineuses et dès lors deux maxima d'action.

La préparation n° 1, lumineuse rouge orangé, a son maximum d'action entre G et H et est impressionnée entre F et P. C'est la matière phosphorescente qui est impressionnable le plus près des rayons les moins réfrangibles. Ainsi qu'on l'a dit page 303, la teinte lumineuse présente une trace de vert, entre O et P, peut-être en raison d'un mélange de sulfure phosphorescent vert dont le maximum de phosphorescence se trouve dans cette partie du spectre.

La préparation n° 2, lumineuse jaune, obtenue à l'aide du spath d'Islande et du soufre, est impressionnable assez vivement depuis N jusqu'au delà de P; de N jusque vers G il y a indice d'une action lumineuse très-faible; ainsi, sauf cette dernière action, les rayons fortement excitateurs pour cette matière sont situés en dehors du violet du spectre, avec leur maximum d'action entre O et P.

La préparation n° 3, obtenue lors de la réaction du soufre sur l'arragonite de Vertaison, offre deux traces lumineuses *ab*, *cd*, la première comprise entre G et H, s'arrêtant brusquement près de G et avant H, et la seconde allant de N au delà de P et se terminant moins brusquement; cette dernière a son maximum d'action, comme la précédente préparation, entre O et P. Entre H et M il n'y a aucun effet produit. La deuxième tache lumineuse *cd*, produite par l'action du spectre, est beaucoup plus vive et plus étendue que la première.

La préparation n° 4, obtenue par la réaction du soufre sur le carbonate de chaux dans certaines conditions, et lumineuse vert légèrement bleuâtre, offre des effets du même genre : il y a deux espaces lumineux

sur la surface impressionnable; le premier *ab* a les mêmes limites G et H que la préparation précédente, en se rapprochant un peu plus de H; la seconde *cd* est plus étendue qu'avec le sulfure n° 3 et va jusqu'en M; mais le maximum d'action est à la même place que précédemment, entre O et P.

La préparation n° 5, qui est phosphorescente couleur bleue indigo, et que l'on obtient lors de la réaction du persulfure de potassium sur la chaux dans certaines conditions, présente des effets très-remarquables lors de l'action du spectre. On observe d'abord deux espaces lumineux, et par conséquent deux maxima d'action : le premier, *ab*, est plus étendu que le premier espace lumineux correspondant aux autres sulfures, et commence à peu de distance de F pour se terminer au delà de H, quoique très-près de cette ligne; avec la préparation n° 4, au contraire, le premier espace lumineux est moins étendu que le deuxième, et l'action la plus vive a toujours lieu néanmoins entre G et H. Mais l'effet le plus curieux que présente cette matière, c'est, ainsi qu'on l'a dit plus haut, page 303, que la partie *ab* est lumineuse violet indigo par phosphorescence et absolument de même teinte que la partie du spectre qui l'impressionne, tandis que la portion *cd* est bleuâtre. Ainsi ce sulfure jouit de la propriété de présenter deux teintes par phosphorescence après l'action de la lumière, et cela suivant la réfrangibilité des rayons actifs.

En opérant avec un petit fragment de ce sulfure phosphorescent, au lieu d'agir avec un carton enduit uniformément de matière, on arrive à la même conclusion, et même l'expérience est plus frappante : en plaçant ce fragment dans la partie GH du spectre, il devient lumineux violet indigo; en le faisant pénétrer dans la partie OP, il ne tarde pas à devenir bleu. En opérant même avec deux fragments dont l'un est placé en GH, l'autre en OP, la différence des teintes qu'il manifeste est bien sensible; en alternant alors les deux fragments, celui qui était violet devient bleu, et l'autre devient violet.

Quant à la sixième préparation phosphorescente violet, elle ne donne lieu qu'à un seul espace lumineux allant de M au delà de P avec le maximum toujours entre O et P; mais on observe une traînée lumineuse au delà de P, et se prolongeant dans la partie la moins réfrangible depuis M jusque vers G. Les préparations 1 et 2 ont présenté un effet du même genre.

Si l'on opérait avec le sulfure de calcium provenant d'autres réactions et obtenu, ainsi qu'on l'a dit dans le 1er chapitre, on verrait que l'é-

tendue des parties actives du spectre peut varier, mais qu'en général il y a deux régions impressionnées et par conséquent deux maxima d'intensité; souvent la région impressionnée la moins réfrangible est plus faible et peut même manquer; mais la deuxième région ou la plus réfrangible est ordinairement comprise entre M et P et va au delà de P. Ainsi, pour le sulfure de calcium, comme pour le sulfure de strontium, la partie la plus réfrangible du spectre représente la région la plus stable de la portion du rayonnement qui excite la phosphorescence, et le maximum d'intensité est situé dans le spectre entre O et P; cette partie active est la même pour les préparations 2, 3, 4 et 5, et se trouve plus éloignée du violet que celle où se manifeste l'action exercée par le sulfure de strontium.

Les préparations de sulfure de calcium ne présentent pas des effets de phosphorescence de courte durée aussi marqués que celles faites avec les sulfures de strontium et de barium. La préparation n° 1, lumineuse rouge orangé, ne m'a pas paru produire d'effet bien net. Les préparations analogues à celles du n° 4 ont donné quelquefois ces effets, mais probablement quand le sulfure n'a pas été calciné trop vivement. J'ai observé que les préparations lumineuses violet et verdâtre, obtenues lors de l'action de l'hydrogène sulfuré ou des sulfures sur la chaux, produisent ce phénomène d'une manière plus marquée que les autres préparations. Je citerai notamment l'antimonio-sulfure de chaux (*voir* page 226), qui au delà de H, entre H et I, donne une lumière jaunâtre dans une partie du spectre où l'action excitatrice de la phosphorescence persistante est très-faible.

On peut expliquer, par l'étendue des parties actives du spectre, un fait observé antérieurement : c'est que le phosphore de Bologne est plus lumineux sous l'action de la lumière du soir que le phosphore de Canton, tandis que ce dernier est plus brillant quand la lumière solaire directe l'a frappé. En effet, le phosphore de Canton (sulfure de calcium) est principalement impressionnable dans les rayons ultra-violets qui manquent en partie dans la lumière diffusée le soir; d'un autre côté, la partie FH du spectre qui influence le sulfure de barium n° 2 (phosphore de Bologne) se trouve dans la lumière diffuse : il en résulte que celle-ci excite proportionnellement plus le second phosphore que le premier.

Dans ces recherches on s'est servi de prismes de flint blanc, parce que le spectre présentant toutes ses raies était obtenu avec une grande

pureté. En employant un prisme de spath fluor ou de quartz, la partie ultra-violette est proportionnellement plus étendue, mais il est fort difficile d'obtenir au moyen de lentilles faites avec ces matières des spectres dont les lignes noires soient bien nettes.

Le sulfure de zinc hexagonal, comme on l'a vu chapitre Ier, page 240, est aussi phosphorescent que les sulfures précédents les plus lumineux, et se prête très-bien à l'étude de l'action du spectre solaire; on n'a pas figuré sur la planche les positions des parties actives, mais il est facile de les indiquer : quand le spectre agit sur la surface qui n'a pas été préalablement impressionnée, on ne trouve qu'une seule partie lumineuse après l'insolation, s'étendant depuis une partie située près de F et égale à $\frac{1}{6}$ ou $\frac{1}{7}$ de la distance GF, jusque vers P; il n'y a donc qu'un seul maximum d'action entre G et H au $\frac{2}{5}$ de la distance GH.

Les rayons qui détruisent la phosphorescence s'étendent depuis F jusqu'au delà de A, et vont même peut-être un peu plus loin de ce côté que ceux qui agissent sur les autres sulfures; c'est pour ce motif qu'on peut employer cette matière pour l'étude de la partie la moins réfrangible du spectre, et ainsi qu'on l'a dit page 144.

Ces résultats montrent que chaque sulfure, et même chaque préparation de sulfure, se comporte différemment par rapport au rayonnement solaire, c'est-à-dire est sensible entre des limites différentes de réfrangibilité. Ils sont relatifs aux effets qui se manifestent à la température ordinaire; lorsque la température du corps est différente, les effets du spectre peuvent varier, comme on le verra dans le chapitre VI.

En se servant d'autres matières il en est encore de même : ainsi avec un fragment de potasse caustique, un très-petit spectre d'une grande vivacité donne entre le bleu et le violet, et même au delà, une impression de peu de durée, le maximum d'action phosphorescente paraissant être entre G et H; le papier sec présente des effets du même genre.

On voit qu'il y a autant d'effets divers et de limites différentes des rayons actifs du spectre qu'il y a de substances impressionnables; mais quant aux trois genres d'effets produits, 1° phosphorescence persistante pendant un temps plus ou moins long, 2° dans quelques cas phosphorescence à très-courte-durée, 3° extinction de la phosphorescence, ils se manifestent nettement avec les substances bien lumineuses; il est à présumer que ces trois genres d'effets peuvent avoir lieu également à un plus faible degré avec les matières beaucoup moins impressionnables. On voit en outre, qu'avec des rayons ultra-violets, c'est-à-dire avec des

rayons obscurs, on produit de la lumière, puisque les sulfures deviennent phosphorescents sous leur influence, et qu'ensuite en faisant tomber sur eux des rayons lumineux on détruit cette faculté et que ces corps redeviennent obscurs.

*Écrans transparents.* — On peut expliquer aisément à l'aide de ces résultats quels sont les effets produits par les écrans transparents et incolores comme le verre et comme certains liquides, quand ces écrans sont interposés entre la source lumineuse active et les matières phosphorescentes; on trouve alors que ces matières brillent plus ou moins ou même redeviennent obscures. C'est ce qui arrive avec les sulfures de calcium, de barium et de strontium, placés à la lumière solaire sous des écrans de créosote ou de bisulfate de quinine; ces matières non-seulement ne deviennent pas lumineuses, mais s'éteignent quand elles sont préalablement excitées.

Or on verra dans la deuxième partie de cet ouvrage (1) que ces écrans sont transparents parce qu'ils laissent passer les rayons compris entre les réfrangibilités A et H du spectre solaire, c'est-à-dire les rayons qui agissent sur la rétine, mais qu'ils peuvent agir par absorption sur les rayons ultra-violets. Ces derniers rayons étant ceux qui excitent principalement la phosphorescence, celle-ci ne peut dont pas se produire, et même si les sulfures sont rendus préalablement actifs, il s'éteignent immédiatement, car la quantité des rayons qui excitent la phosphorescence et qui traversent l'écran est moins grande que celle des rayons qui la détruisent.

*Raies du spectre solaire.* — Puisque les différents effets lumineux, chimiques, phosphorescents, produits sous l'influence de la lumière, sont dus à l'action d'un seul rayonnement et ne varient que suivant la nature des corps soumis à son influence, on doit donc retrouver dans les images spectrales obtenues sur les corps phosphorescents les mêmes raies obscures que l'on observe aux mêmes places dans le spectre lumineux et, comme on le verra dans la deuxième partie, les mêmes que celles que l'on trouve dans les impressions spectrales photographiques.

Pour démontrer ce fait à l'aide de ces phénomènes (2), j'ai agrandi l'image du spectre solaire par projection, car sans cela on ne peut distinguer les raies sur les surfaces phosphorescentes. On peut expliquer

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 319.
(2) *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. 40, p. 363 (1842).

ce résultat en remarquant que lors de l'action lumineuse les premières parties du corps phosphorescent qui sont frappées agissent comme sources lumineuses pour impressionner les points voisins, de sorte que l'action excitatrice n'est pas exactement limitée à la place directement éclairée par les rayons incidents. J'ai agi alors avec une image prismatique qui, si elle avait été prise dans toute son étendue, aurait eu au moins 2 mètres de longueur ; à cet effet, au lieu de recevoir immédiatement le spectre par projection au foyer d'une lentille de 60 cent. à $1^m$ de distance focale sur une surface enduite d'une matière vivement phosphorescente, on place sur la route des rayons qui ont traversé cette lentille, une seconde lentille de 1 décim. de foyer au plus, de façon que le foyer de la première lentille tombe entre le foyer et la surface de la seconde ; alors, de l'autre côté de celle-ci on a quelque part un spectre bien agrandi ; en promenant donc la seconde lentille dans toutes les parties du spectre primitif, puis en cherchant par projection avec un carton blanc quel est le lieu de l'image, on a un spectre dans lequel les raies sont larges et bien distinctes ; en le recevant sur la surface enduite de matière phosphorescente, on retrouve les mêmes raies que dans le spectre lumineux et que dans les impressions photographiques pour les parties de même refrangibilité.

Pour étudier convenablement ces raies, on reçoit pendant quelques secondes le spectre sur la surface, puis on referme l'ouverture du volet, et l'on porte immédiatement la température de la surface à 150 ou 200° ; alors les parties qui ont reçu l'impression des rayons actifs deviennent fortement lumineuses, tandis que les autres portions correspondantes aux raies obscures restent totalement noires. Les raies sont faciles à distinguer de cette manière dans les rayons les plus réfrangibles, mais plus difficiles à voir dans les rayons les moins réfrangibles, car elles sont moins distinctes.

*Corps phosphorescents, visibles seulement dans le phosphoroscope.* — Quand on éclaire successivement les corps placés dans le phosphoroscope par les différents rayons du spectre solaire, on peut reconnaître quelles sont les parties actives sur les corps qui n'offrent qu'une faible persistance à l'impression que la lumière exerce sur eux. Voici les effets observés avec plusieurs substances :

| | Limites du spectre solaire entre lesquelles l'action est comprise. |
|---|---|
| Spath d'Islande, phosphorescent rouge orangé. | D'un côté en D dans le jaune, de l'autre en G dans le bleu. Le maximum d'action est près de F dans le bleu. |
| Leucophane, phosphor. rouge orangé. | D'un côté en D, de l'autre près de H dans le violet. Le maximum d'action est vers F. |
| Double cyanure de platine et de potassium, phosph. blanc légèrement vert-jaunâtre. | D'un côté près de E dans le vert, de l'autre entre G et H. Le maximum d'action est entre F et G. |
| Verre ordinaire (tube), phosphorescent vert. | D'un côté dans le vert près de E, de l'autre vers H. Maximum près de G, entre G et H. |
| Nitrate d'urane, phosphorescent vert. | D'un côté près de F, de l'autre jusqu'en P, très-loin au delà du violet. Le maximum d'action paraît entre G et H. |

Il est évident que l'on trouve des effets du même ordre que ceux qui se manifestent avec les sulfures alcalino-terreux, puisque chaque substance est impressionnable entre des limites différentes de réfrangibilité; le spath d'Islande, par exemple, n'est pas lumineux en dehors du spectre, tandis que le nitrate d'urane donne des effets bien au delà des rayons violets. En outre, la teinte de la lumière émise dépend du corps impressionnable, et nullement de la réfrangibilité de la partie active de la lumière, puisque le spath n'émet que des rayons orangés, et cela par l'influence de la partie verte et bleue du spectre, tandis que le nitrate d'urane ne donne que de la lumière verte sous l'influence des rayons violets et ultra-violets. Au reste, dans le chapitre suivant, on citera un grand nombre d'effets de ce genre obtenus avec différentes matières.

On peut mettre le même fait en évidence en se servant d'écrans de verre coloré que l'on dispose devant l'ouverture extérieure du phosphoroscope; si l'on place un écran de verre jaune clair, qui ne laisse passer que la partie la moins réfrangible du spectre jusqu'au bleu, le spath d'Islande placé dans l'intérieur de l'appareil est seulement un peu moins lumineux que sans l'interposition de cet écran, tandis que le nitrate d'urane brille très-peu; avec un verre bleu de cobalt foncé, le spath d'Islande est au contraire à peine lumineux, mais le nitrate d'urane brille très-vivement; ces effets dépendent, comme avec les sulfures alcalino-terreux, de la réfrangibilité des rayons actifs.

On n'a pu reconnaître jusqu'ici s'il y a des parties du spectre qui agissent de manière à présenter une persistance inégale dans l'impression exercée par la lumière, mais il sera facile de pouvoir étudier de

nouveau ces effets. Il en est de même de l'étude que l'on pourra faire pour savoir si la partie la moins réfrangible agit sur certains corps comme sur les sulfures alcalino-terreux, c'est-à-dire en sens inverse des autres rayons, et pour détruire l'effet produit par les rayons les plus réfrangibles.

§ 2. *Phosphorescence de très-courte durée; effets présentés par les corps organiques comme le bisulfate de quinine, l'esculine, la chlorophylle, etc..., exposés à l'action des rayons violets et ultra-violets du spectre.*

On a vu dans le paragraphe précédent, page 301, que l'action des rayons ultra-violets sur les sulfures phosphorescents pouvait donner lieu à une émission de lumière de très-courte durée après l'action du rayonnement; ces phénomènes peuvent avoir également lieu en projetant l'image prismatique sur des matières solides comme certains spaths fluors sur du verre d'urane, ou sur des liquides comme les dissolutions de bisulfate de quinine, de chlorophylle, matières qui ne présentent pas habituellement la phosphorescence quand, par la fenêtre d'une chambre noire, on n'a recours qu'à une simple exposition à la lumière et qu'on les rentre rapidement dans l'obscurité.

M. Brewster (1) est le premier qui ait étudié les effets de coloration de ce genre dans les cristaux de spath fluor du Derbyshire, donnant sous certaines incidences des nuances bleues plus ou moins vives, différentes de la couleur propre de la matière, ainsi qu'avec plusieurs dissolutions organiques. En 1845, M. J. Herschell (2) chercha à expliquer ces effets en admettant qu'il se produisait à la surface de certains corps une diffusion, qu'il nomma diffusion épipolique. En 1852 (3) M. Stokes analysa ces phénomènes, et crut pouvoir les expliquer en les rapportant à une nouvelle propriété de la lumière. D'après ce physicien, certains rayons lumineux, en tombant sur les corps qui donnent lieu à ces effets de coloration, changent de réfrangibilité, c'est-à-dire de longueur d'onde, et donnent lieu à une diffusion différente de celle qui se produit

(1) *British assoc. fort. the avanc. of. scienc.* (1838). — *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. 38, p. 376.

(2) *Philos. transact.*, 1845, p. 143 et 145. — *Ann. de chimie et de physique*, t. 38, p. 378.

(3) *Philosoph. trans.*, 1852, p. 463. — *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 38, p. 490.

dans les conditions ordinaires; cette diffusion avait reçu depuis le nom de fluorescence.

Pour observer ces phénomènes on peut simplement promener le long d'un spectre solaire suffisamment pur pour que l'on puisse voir les différentes raies noires, et suffisamment intense, un tube cylindrique plein d'une dissolution de sulfate acide de quinine, ou bien une dissolution alcoolique de chlorophylle. Si l'on part du rouge extrême en marchant vers le violet, on n'observe rien de particulier tant qu'on n'est pas arrivé tout près de l'extrémité la plus réfrangible du spectre; la lumière passe sans modification à travers le tube. Mais un peu avant d'atteindre l'extrême violet, on voit apparaître une lumière bleue avec le sulfate de quinine, et rouge avec la chlorophylle. Cette lumière est diffusée par la première surface du tube et ne disparaît pas lorsque le tube a dépassé l'extrémité violette du spectre; elle se trouve en conséquence dans les rayons invisibles, de façon qu'un assez grand espace situé au delà du violet peut ainsi être successivement illuminé dans ces diverses parties, absolument comme avec les sulfures alcalino terreux décrits dans le paragraphe précédent. Ces rayons ultra-violets se transmettent dans les liquides, et l'on peut opérer aussi bien par transmission que par réflexion, si la dissolution est peu colorée.

Quand on opère par réflexion, on se borne à placer les dissolutions dans une petite cuve en verre mince dont la face antérieure est plane; si le corps est solide, on agit directement sur sa surface. Avec les matières qui fixées sur un papier ou sur un carton donnent les mêmes effets, ce mode d'expérimentation est très-facile. Le bisulfate de quinine est dans ce dernier cas, puisqu'une feuille de papier ou de carton blanc enduit d'une legère couche de ce composé présente les mêmes effets qu'une dissolution de ce sel (quand on fait cette préparation il est préférable de dissoudre le sulfate de quinine ordinaire dans de l'eau légèrement acidulée par l'acide tartrique, au lieu d'employer l'acide sulfurique; car le papier enduit d'une dissolution même très-faible d'acide sulfurique se colore en jaune brun à la lumière).

En opérant ainsi on voit sur ces surfaces des effets analogues à ceux que l'on observe sur les surfaces enduites de sulfures alcalino-tereux, et l'on a une prolongation de l'image prismatique au delà du violet; en même temps les raies de la partie ultra-violette sont vues avec grande netteté, ainsi qu'on l'a déjà dit dans le livre IV.

M. Stokes a indiqué un moyen de reconnaître quand certaines sub-

stances présentent des effets de ce genre même dans les parties lumineuses du spectre, ce que l'intensité des rayons directs ne permet pas de voir immédiatement.

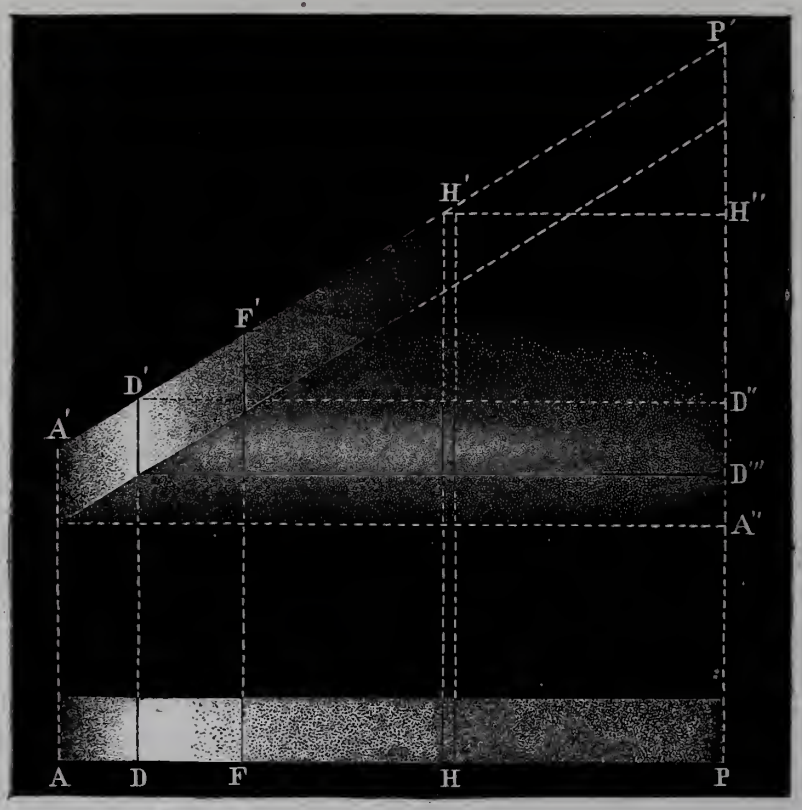



Fig. 33.

On fait arriver un spectre horizontal, bien intense et étroit, sur la substance à éprouver : soit A P ce spectre, fig. 33, A étant le côté rouge et P l'extrémité la plus réfrangible ; A, D, H, P représentent les lignes noires du rouge, du jaune, du violet et de l'ultra-violet. On le regarde à travers un second prisme à arêtes horizontales. Si la substance ne fait que réfléchir irrégulièrement la lumière incidente, on voit seulement à travers le second prisme l'image du spectre relevée et inclinée à l'horizon en A' D' H', comme dans l'expérience connue sous le nom d'expérience des prismes croisés de Newton. Mais s'il se produit à la surface de la substance un phénomène du genre de celui que l'on observe sur les matières sensibles, alors les parties rendues actives du spectre A P envoient vers le prisme des rayons moins réfrangibles que les rayons incidents ; ainsi, au point H du spectre horizontal A P on verra à la fois et les rayons refléchis qui se réfractent en H', et les rayons émis en vertu du phénomène particulier que l'on étudie, et qui étant moins réfrangibles vien-

nent se réfracter seulement au-dessous de H′ entre A′A″ et H′H″. Chaque groupe de rayons séparés par le prisme dans le sens vertical produit une sorte de spectre linéaire, et l'ensemble de ces spectres linéaires présente l'apparence d'un spectre unique très-large horizontal D′ D″, mais moins intense que A′ H′. S'il y a des points du spectre AP où la lumière incidente ne produise aucun effet, à ces points correspondront des bandes obscures verticales. M. Stokes a nommé ce spectre spectre dérivé. Comme les rayons qui le composent sont compris entre les réfrangibilités A et H, cette image horizontale sera comprise d'une part entre A′ A″ et de l'autre entre H′ H″.

Cette méthode a fait connaître qu'un très-grand nombre de substances, surtout de matières organiques végétales ou animales, donnent lieu à une émission de rayons d'une autre réfrangibilité que celle des rayons incidents quand elles sont éclairées par les rayons colorés du spectre solaire. Ainsi, indépendamment de certains échantillons de spath-fluor comme ceux du Derbyshire, des composés d'uranium et des platinocyanures dont on parlera dans le chapitre suivant, ainsi que des dissolutions de quinine, d'esculine, de chlorophylle produisent ces effets à un très-haut degré; la dissolution de bois néphrétique, dont l'apparence à la lumière n'avait pu être expliquée (1), donne un effet de même genre. On peut citer parmi les substances actives les plus communes les verres, diverses espèces de bois, le liége, la corne, les eaux, l'ivoire, les coquilles, le cuir, la peau, etc. Les métaux ainsi que le charbon, le soufre, le quartz, etc., ne donnent aucun effet. Le papier blanc est très-sensible, car l'on sait qu'il est très-phosphorescent; la craie offre peu d'action : aussi une surface enduite de cette matière donne un spectre où les couleurs sont vues presque entièrement par diffusion.

M. Stokes, comme on l'a dit plus haut, avait rapporté ces phénomènes à une diffusion particulière, qui avait reçu le nom de fluorescence. Cette explication a dû être abandonnée ainsi que la dénomination de fluorescence, car les effets dont il s'agit ne sont autres que des effets de phosphorescence, qui dans quelques cas ont une durée extrêmement courte. Il résulte néanmoins de l'étude faite par M. Stokes que les rayons émis par les corps rendus lumineux dans les circonstances dont il s'agit sont dans des conditions différentes de celles des rayons incidents, et ont toujours une longueur d'onde plus grande que celle de ces

(1) Herschell, *Traité d'optique, trad. franç.*, t. 2, p. 322.

derniers, c'est-à-dire que la lumière émise par le corps est au plus de même réfrangibilité et en général moins réfrangible que la lumière incidente; ce résultat est analogue à celui auquel m'a conduit l'observation des phénomènes beaucoup plus généraux de phosphorescence.

Aussitôt après la publication de ces résultats, je ne doutai pas que les effets lumineux dont il était question ne fussent analogues à ceux dont j'ai parlé plus haut, et qui se produisent lorsque les rayons violets et ultra-violets viennent agir sur les corps phosphorescents, mais seulement pendant un temps très-court. Mais comment démontrer l'émission lumineuse par un corps en vertu de son action propre, et cela pendant un intervalle de temps très-petit? C'est en réfléchissant ainsi aux différents moyens propres à prouver l'identité des effets de fluorescence avec ceux de phosphorescence que je fus conduit à la construction du phosphoroscope que j'ai décrit précédemment page 247 et suivantes.

Actuellement, cette conclusion paraît tellement évidente qu'il est inutile d'insister longuement sur sa démonstration ; les corps tels que le verre, les rubis, les spinelles, les diamants, le fluorure de calcium, les composés d'uranium, le platino-cyanure de barium, qui donnent lieu à une émission lumineuse quand la lumière violette et ultra-violette les frappe, présentent une émission de lumière semblable dans le phosphoroscope alors qu'on les voit après l'action lumineuse; bien plus, si au moyen d'un prisme et d'une lunette on analyse la lumière émise comme on le verra dans le chapitre suivant, on trouve une composition identique dans les deux cas.

La plupart des corps qui donnent lieu à ces effets deviennent lumineux dans le phosphoroscope, et il n'y a que quelques dissolutions organiques qui ne paraissent pas visibles; il semble donc que dans les liquides la durée de la persistance des impressions lumineuses soit bien plus petite que dans les corps solides. Ainsi un petit écran en quartz rempli de chlorophylle ou de bisulfate de quinine ne paraît pas visible avec le maximum de vitesse de rotation que l'on peut donner aux disques du phosphoroscope.

D'un autre côté, dans les rayons violets et dans le phosphoroscope on peut quelquefois observer une émission de rayons de couleur différente : ainsi un morceau de papier enduit de bi-sulfate de quinine, puis desséché, est lumineux dans cet appareil, mais avec une lumière jaunâtre différente de la lumière bleue obtenue dans les rayons les

plus réfrangibles. Le double cyanure de platine et de potassium est lumineux avec une belle teinte bleue dans les rayons ultra-violets ; dans le phosphoroscope il présente une teinte blanche légèrement jaune-verdâtre. Il est facile de prouver que cette différence tient à ce qu'il se manifeste sur ces corps une double action analogue à celle qui se produit sur le diamant et sur le fluorure de calcium, et comme on le montre dans le chapitre suivant. En effet, en plaçant dans le phosphoroscope quelques cristaux de double cyanure de platine et de potassium, on trouve dans le spectre, ainsi que cela a été indiqué dans le tableau de la page 315, que l'action lumineuse jaunâtre ne se montre que depuis le vert jusqu'au violet et n'a nullement lieu au delà du violet ; or, c'est au delà du violet que la lumière bleue si vive se manifeste. Ainsi, avec ce corps l'action que le phoscoroscope accuse est donc autre que celle produite par la partie ultra-violette du spectre solaire, ou du moins correspond à une émission de rayons d'une plus longue persistance ; jusqu'ici les appareils n'ont pu permettre de déterminer la durée de la persistance de l'action lumineuse qui donne lieu à ce dernier effet.

Il est possible qu'en ayant un phosphoroscope qui permette d'obtenir une limite inférieure beaucoup plus éloignée on parvienne, par la mesure du temps qui sépare l'action lumineuse du moment de l'observation, à déterminer la durée de la persistance de l'impression exercée par la lumière sur les corps tels que ceux qui ont été cités plus haut, à moins que cette durée ne soit au-dessous de toute limite d'observation, ou même qu'il y ait des corps qui ne soient seulement en vibration que pendant l'action lumineuse. Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus avec tous les autres corps ainsi qu'avec les sulfures alcalino-terreux, qui présentent également ce phénomène, montrent que ces différents effets lumineux ne tiennent pas à une propriété nouvelle de la lumière, à une diffusion particulière, comme le croyaient M. J. Herschell et M. Stokes, mais rentrent dans les effets de phosphorescence ou d'émission lumineuse par action propre des corps, puisqu'ils peuvent même durer après l'action de la lumière excitatrice ; ils n'en diffèrent donc que par le temps pendant lequel l'impression produite par la lumière peut se conserver.

§ 3. *Action des écrans colorés et de diverses sources lumineuses; action de la lumière électrique; tubes à air raréfié avec matières phosphorescentes.*

On a vu dans le paragraphe premier, page 313, qu'on explique facilement les effets produits par l'interposition des écrans blancs et transparents placés sur la route des rayons lumineux avant leur action sur les corps phosphorescents, par ce motif que ces écrans laissent plus ou moins bien passer la partie ultra-violette du spectre.

D'après les mêmes motifs on se rend aisément compte des effets produits par les écrans colorés : si l'on emploie des lames de verre colorées en rouge, orangé, jaune ou vert, lames qui arrêtent presque totalement les rayons les plus actifs pour exciter la phosphorescence, on ne voit rien de bien manifeste, si ce n'est dans des circonstances spéciales qui seront indiquées dans le chapitre IV, en employant le phosphoroscope ou bien quand on agit avec les sulfures-alcalino terreux, ces écrans laissant traverser les rayons qui détruisent la phosphorescence comme on l'a expliqué précédemment, page 300 ; mais si l'on se sert d'écrans en verre coloré en bleu foncé par le cobalt ou de teinte violette, ces écrans laissent passer les rayons les plus réfrangibles qui excitent vivement la phosphorescence ; et comme ils arrêtent en même temps les rayons colorés les plus intenses, l'observateur peut percevoir quelques-uns des phénomènes lumineux dont on a parlé précédemment, et cela pendant l'action du rayonnement et sans être dérangé par la coexistence des rayons bleus et violets qui agissent faiblement sur la rétine. On n'a pas besoin alors d'avoir recours à la partie ultra-violette de l'image prismatique, et les substances vivement phosphorescentes manifestent leur action au milieu d'un faisceau de rayons qui ont traversé ces écrans.

Pour opérer aisément, on concentre dans l'intérieur d'une chambre noire, à l'aide d'une lentille, un faisceau de rayons solaires qui a préalablement traversé un écran de verre violet fixé au volet, et l'on place au delà du foyer, dans le faisceau divergent des rayons violets, les corps que l'on veut étudier. Toutes les parties qui ne donnent lieu à aucune action paraissent violettes par la diffusion des rayons incidents, mais les matières qui sont douées de phosphorescence deviennent plus ou moins vivement lumineuses, et émettent des rayons colorés qui dépendent de leur nature et de leur état physique, de la même manière que si elles étaient placées dans la partie ultra-violette du spectre.

Si l'on place dans ce faisceau divergent des diamants, certains d'entre eux deviennent bleus; d'autres, qui ne sont pas phosphorescents, restent avec la couleur violette foncée de la lumière incidente. Les platino-cyanures s'illuminent avec leur couleur de phosphorescence; si l'on fait usage d'un vase rempli d'une dissolution de bisulfate de quinine, ce vase paraît d'un beau bleu, et la lumière propre qu'il émet forme un contraste frappant avec la lumière violette qui est diffusée par les objets placés autour; une dissolution alcoolique de chlorophylle un peu étendue est rouge; l'huile de colza semble verdâtre; un vase d'urane paraît d'un beau vert; enfin, on observe les mêmes effets que ceux qui ont été décrits dans le paragraphe précédent. Le faisceau lumineux cesse-t-il de frapper les corps, comme la durée de la persistance des impressions que la lumière exerce sur eux est fort petite, ils deviennent presque instantanément obscurs.

Si au lieu de ces matières on dispose sur la route des rayons violets des tubes remplis de sulfures alcalino-terreux phosphorescents, et principalement des sulfures de strontium vert, et de barium orangé, non-seulement des effets analogues ont lieu pendant l'action de la lumière, mais encore ils persistent dans l'obscurité pendant un temps plus ou moins long dépendant du degré de persistance des impressions lumineuses sur ces matières.

On peut tracer des dessins sur du papier avec une dissolution étendue de sulfate de quinine dans l'eau acidulée par l'acide tartrique, et quand le papier est sec, à la lumière blanche, ces dessins ne sont pas visibles. Lors qu'ils sont placés dans le faisceau de lumière violette, ils deviennent plus lumineux que le reste de la surface, et leur couleur bleue très-vive forme un contraste frappant avec la teinte violette foncée que prend le papier. Si l'on trace des dessins semblables ou des bandes à l'aide d'une solution de gomme arabique sur des écrans en papier, en carton ou en verre placés préalablement dans une position horizontale, et qu'au moyen d'un petit tamis on fasse adhérer sur la surface gommée des sulfures alcalino-terreux pulvérisés, principalement les deux sulfures que je viens de citer (sulfure de strontium lumineux vert, et sulfure de barium lumineux orangé), une fois la gomme sèche, on peut placer les écrans dans le faisceau des rayons violets, et les dessins apparaissent illuminés en vert ou en orangé, suivant la couleur de la matière employée.

Je citerai encore une expérience qui est fort curieuse : elle

consiste à disposer au volet d'une chambre noire, ou de la lanterne d'un appareil photo-électrique, un écran en verre violet, E, fig. 34, ainsi

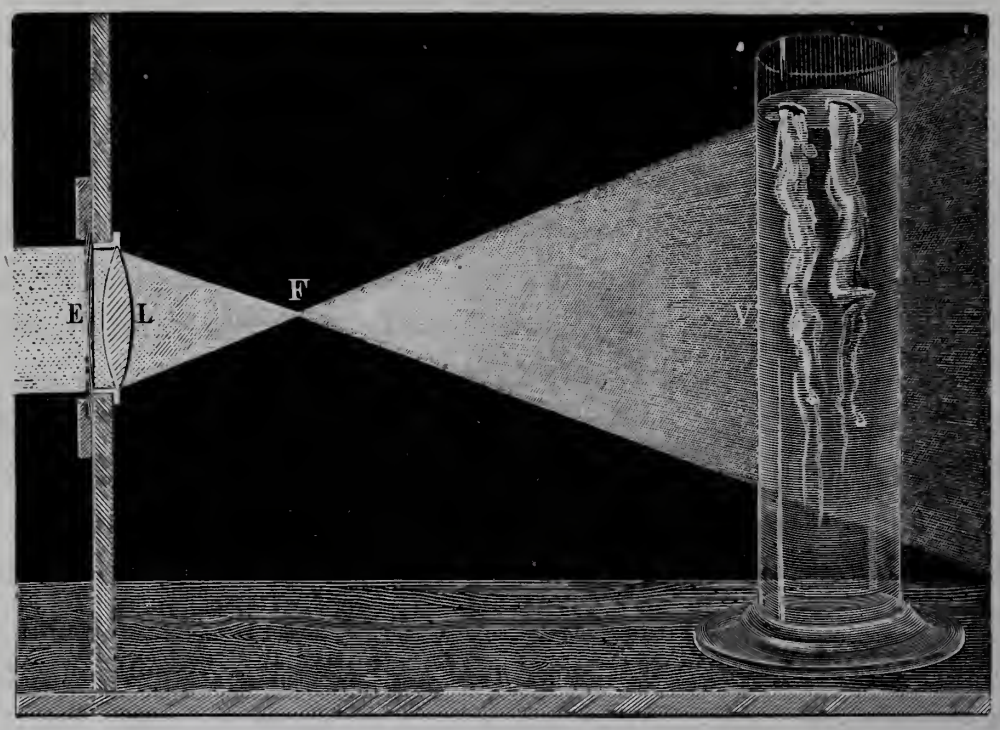



Fig. 34.

qu'une lentille, L, et à exposer dans le faisceau de rayons violets formé au delà du foyer F de la lentille, un vase V rempli d'eau, sur laquelle on fait flotter quelques fragments d'écorce de tige de maronnier d'Inde (*æsculus pyhocastanea*). L'esculine que renferme l'écorce commence à se dissoudre dans l'eau, et l'on voit aussitôt des traînées bleuâtres assez vivement lumineuses, qui accusent la présence de cette matière, descendre verticalement dans l'eau, dont la teinte est plus sombre et dont la couleur est violet foncé comme celle du faisceau des rayons incidents. Si au bout de quelques instants on agite l'eau, l'esculine se mélange à toutes les couches, et le vase entier prend la teinte bleue due à l'émission de la lumière par action propre, ce qui prouve qu'une très-petite quantité de cette substance suffit pour donner à l'eau son pouvoir de phosphorescence.

Ces expériences diverses faites avec le faisceau de lumière violette sont très-frappantes, et sont répétées surtout dans les cours en raison de leur facilité de disposition et par ce motif que l'on peut substituer aux rayons solaires les rayons émanés de l'arc voltaïque, c'est-à-dire des lampes photo-électriques.

Les différentes lumières ont donc une activité qui dépend de leur

composition et de leur intensité. A composition égale, l'intensité seule influe ; aussi la lumière de la lune agit-elle moins énergiquement que la lumière solaire, mais elle illumine néanmoins d'une manière assez sensible les sulfures alcalino-terreux. Ainsi les matières phosphorescentes sont donc bien plus impressionnables par la lumière que les thermomètres ne le sont sous l'action des rayons calorifiques, car les rayons lunaires, comme on l'a dit au commencement de cet ouvrage, ne donnent pas d'effet thermométrique appréciable dans les conditions ordinaires.

Les lumières artificielles, principalement celles qui donnent lieu à une émission de rayons très-réfrangibles, peuvent être très-actives. Tel est le cas de la lumière émise lors de la combustion du soufre dans l'oxygène. Pour produire cette réaction, comme on l'indique fig. 34 *bis*. on place dans une petite coupelle un fragment de soufre que l'on enflamme et que l'on plonge au milieu d'une cloche remplie d'oxygène; la combustion devient très-vive, et il se manifeste une lumière bleue donnant lieu aux différents effets qui viennent d'être cités.

Fig. 34 *bis*.

La lumière donnée par la lampe au magnésium, dont il a été question page 111, est également très-active; sous l'action de cette dernière les sulfures alcalino-terreux deviennent phosphorescents comme dans la partie ultra-violette du spectre.

D'après les mêmes motifs les flammes des lampes formées avec de l'alcool tenant en dissolution différents sels métalliques seraient plus ou moins actives suivant la réfrangibilité des éléments qu'elles renfermeraient. Quand on veut employer ces sources lumineuses, soit pour ces expériences soit pour d'autres effets, on fait brûler le mélange liquide dans une lampe dont le support de la mèche est à double courant d'air et la mèche cylindrique, et dans le tube central on fait arriver un courant d'oxygène, qui active la combution et donne une grande vivacité à la lumière.

La source lumineuse artificielle la plus active, en raison des éléments très-réfrangibles qu'elle renferme, est la lumière électrique, soit celle émanée de l'arc voltaïque, soit celle des étincelles électriques, qui donne les effets les plus énergiques que l'on puisse produire; les

effets qu'elle présente, et surtout les effets produits par les décharges des condensateurs, ont donné lieu à des recherches très-intéressantes.

Pour soumettre les corps à l'action des décharges électriques, on les place sur la tablette de l'excitateur universel quand ils sont en fragments, ou dans des tubes s'ils sont en poussière, de manière à ce que l'extrémité des conducteurs soit à une distance de 2 à 3 centimètres. On fait passer ensuite de l'un à l'autre conducteur, très-près du corps, la décharge d'une batterie électrisée avec une machine électrique. Lorsqu'on veut agir avec une série de décharges, on fait communiquer les deux tiges de l'excitateur aux deux extrémités d'une forte bobine d'induction de Ruhmkorff comme celle représentée fig. 28 *bis*, page 204, en fixant également des fils qui touchent à ces deux branches aux armatures intérieures et extérieures d'une forte jarre; de cette manière on peut avoir au moins 2 décharges par seconde, et même plus, c'est-à-dire de 100 à 200 décharges par minute.

Si l'on fait passer une décharge électrique sur un morceau de craie, tout l'appareil étant situé dans une chambre noire, et l'observateur ayant l'attention de tenir les yeux fermées avant l'expérience et de ne les ouvrir qu'au moment où il entend éclater l'étincelle, il aperçoit immédiatement après, sur le trajet parcouru par elle, une traînée lumineuse diversement colorée qui peut durer une minute. Un fragment de sulfate de baryte donne une lumière verte brillante; l'acétate de potasse, le sucre, l'acide succinique produisent des effets semblables, mais plus durables. Les phosphores artificiels donnent des effets très-brillants, et produisent les nuances qu'ils prennent après leur exposition à la lumière solaire, et même pour eux il n'est pas besoin d'exciter l'étincelle aussi près de leur surface; à quelque distance l'effet est le même quoique moins intense.

J'ai déjà parlé, livre III, page 51, des phénomènes que pouvait produire la décharge, et j'ai indiqué quelles sont les modifications permanentes que prennent certains corps comme le spath-fluor, la chaux phosphatée et le diamant; j'ai dit que ces effets provenaient de l'action lumineuse, et non pas d'un choc ou d'un effet moléculaire particulier produit par l'électricité. Seulement, comme l'intensité lumineuse est très-forte surtout quand les décharges éclatent à la surface des corps, sous leur influence on peut rendre phosphorescents des corps qui ne donneraient pas des effets appréciables dans les conditions ordinaires après leur exposition à la lumière solaire, ou même après leur exposition à la lu-

mière émanée de l'arc voltaïque formé entre des conducteurs en charbon.

Ce résultat a été mis hors de doute au moyen des expériences faites par mon père, puis à l'aide de celles qu'il a faites conjointement avec M. Biot (1). Onsait que les sulfures alcalino-terreux, qui sont phosphorescents par insolation, redeviennent obscurs quand on les échauffe dans l'obscurité ; l'étincelle électrique excitée à distance, dans les conditions qui viennent d'être indiquées, leur rend instantanément cette propriété quand elle éclate à peu de distance. Mon père et M. Biot ont opéré principalement en se servant de coquilles d'huîtres calcinées avec du soufre, c'est-à-dire de sulfure de calcium. Quand on fait éclater ainsi successivement plusieurs d'entre elles, l'intensité de la lumière émise augmente jusqu'après plusieurs décharges, puis l'effet se reproduit toujours le même avec le même corps. Il provient sans doute de ce que le temps pendant lequel l'action excitatrice se manifeste ne suffit pas pour leur donner le maximum d'effet. Il serait même possible, d'après ce qui a été dit dans le chapitre II, d'arriver à pouvoir estimer par les expériences de ce genre le temps de la durée d'une décharge.

L'excitation phosphorique a même lieu, mais à des degrés plus ou moins marqués, quand on interpose entre la décharge et les matières phosphorescentes des écrans incolores ou colorés de diverse nature. Afin de faire la comparaison des effets produits, MM. Becquerel et Biot ont placé au-dessus de ces sulfures, des écrans mixtes formés par des lames de verre et de matières comme la chaux sulfatée ou le cristal de roche, lames mastiquées par un de leurs bords, de façon à ce qu'une de leurs surfaces se trouvât dans le même plan. En excitant la décharge au-dessus de la ligne de séparation, une moitié de la décharge donne de la lumière qui traverse une des substances, l'autre moitié envoie des rayons qui n'arrivent au sulfure de calcium qu'après après avoir traversé l'autre écran. Ils ont ainsi trouvé que le quartz et la chaux sulfatée limpide laissent très-bien passer la partie du rayonnement qui produit la phosphorescence de ce sulfure, tandis que le verre blanc en arrête une partie ; entre les deux premiers corps, la chaux sulfatée paraît être plus transparente pour les rayons actifs que le quartz qu'ils ont employé. Ils ont trouvé également que le quartz enfumé se laisse traverser mieux que le verre par ces rayons et presque aussi bien que le quartz limpide. Ils ont

(1) Becquerel, *Traité de physique appliquée à l'histoire naturelle*, t. 2, p. 150. — *Archives du Muséum d'histoire naturelle*, 1839, t. 1, p. 215.

pu conclure de leurs recherches que la portion du rayonnement qui influence le sulfure de calcium phosphorescent se comporte différemment, par rapport aux écrans incolores, que celle qui agit sur la rétine. On a vu, dans les deux premiers paragraphes de ce chapitre, que l'étude prismatique a pu conduire à la même conclusion, et que l'on pouvait même spécifier les parties actives du rayonnement lumineux pour les différentes matières impressionnables.

Lorsque la décharge d'une batterie éclate dans l'air, l'intensité rayonnante de l'étincelle est plus grande à la pression ordinaire que dans ce gaz raréfié. C'est que j'ai démontré (1) en faisant passer simultanément la décharge d'une même batterie dans deux ballons disposés comme des excitateurs, et renfermant la même matière phosphorescente ; en faisant le vide dans l'un, l'effet produit par la décharge se trouve diminué.

Cependant, dans l'air raréfié la lumière électrique a une teinte violacée qui indique la présence d'éléments très-réfrangibles pouvant exciter la phosphorescence des matières impressionnables. Cette remarque m'a conduit à faire usage d'une nouvelle disposition (2) pour étudier les phénomènes de phosphorescence dus à l'action de la lumière électrique, et qui consiste à appliquer à l'électricité le principe qui a servi de base à la construction du phosphoroscope ; pour atteindre ce but, on raréfie l'air à 1 ou 2 millimètres de pression dans des tubes de verre de 2 à 3 centimètres de diamètre environ, et de 40 à 50 millimètres de longueur, et dans lesquels on a introduit les substances phosphorescentes, soit en fragments, soit en poudre. La figure 35 représente plusieurs tubes AB, A′B′, A″B″, A‴B‴, supportés par des pieds isolants en verve et disposés de manière à pouvoir être électrisés simultanément. Aux extrémités de ces tubes ont été soudés préalablement des fils de platine qui, sortant au dehors, touchent aux douilles en cuivre A, B, A′, etc. La partie effilée qui se voit sur la droite, près des extrémités, sert à raréfier l'air dans le tube avec une machine pneumatique et à sceller le tube. On peut alors faire passer isolément ou simultanément au travers de ces tubes, maintenus horizontalement, des décharges électriques provenant soit d'une machine électrique ordinaire, soit d'une batterie, soit d'un appareil d'induction.

En opérant dans l'obscurité à l'aide de la décharge d'une batterie,

(1) *Archives du Muséum*, 1839, t. 1, p. 215. — Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 161. — *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 8, p. 493.

(2) *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, t. 55, p. 93 (1857).

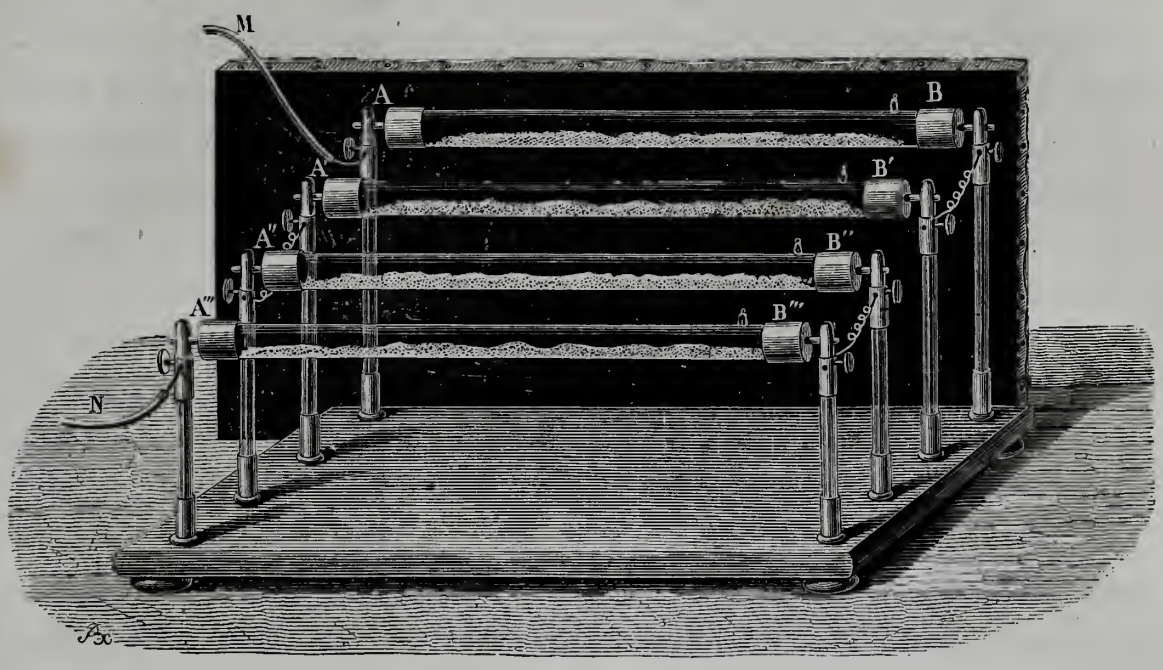



Fig. 35.

on a un effet très-brillant, mais de courte durée, et ensuite la matière phosphorescente émet de la lumière pendant un temps plus ou moins long suivant sa puissance de phosphorescence. Si l'on fait usage de la décharge continue d'une machine électrique ou d'un appareil d'induction, les décharges électriques qui traversent l'air raréfié du tube, et qui émettant des rayons lumineux très-réfrangibles ont une teinte violacée bien connue, en passant très-près de la surface des corps excitent la phosphorescence de ces derniers au plus haut degré; non-seulement après leur passage les substances phosphorescentes conservent pendant un certain temps la propriété de luire comme si on les eût exposées à la lumière solaire, mais encore pendant ce passage même elles sont lumineuses d'une manière continue, et cela avec une intensité d'autant plus grande que l'action électrique est plus énergique. Cet effet tient à ce que les matières étant excitées à chaque instant par les décharges qui se succèdent à des intervalles très-courts, émettent de la lumière non-seulement à l'instant où elles sont impressionnées, mais encore après; car la durée de la persistance de l'impression que la lumière exerce sur eux est en général plus grande que l'intervalle qui sépare deux décharges consécutives : ce motif et la persistance des impressions lumineuses sur la rétine rendent continu l'effet lumineux perçu par l'observateur.

Il se manifeste donc, à l'aide de cette disposition, des effets analo-

gues à ceux que l'on observe dans le phosphoroscope, si ce n'est que les décharges électriques remplacent les éclats intermittents que la lumière solaire produit en pénétrant dans cet appareil. D'un autre côté, ce mode d'expérimentation est éminemment propre à montrer l'action exercée par la lumière sur les corps dans lesquels la durée de la persistance de l'impression lumineuse ne subsiste que pendant un temps très-court, tels que le bisulfate de quinine, le double cyanure de platine et de potassium, etc., et que le phosphoroscope ne peut accuser. L'électricité n'agissant que comme source lumineuse, on voit que ce mode d'expérimentation donne principalement l'effet des rayons les plus réfrangibles.

En plaçant dans les tubes les sulfures alcalino-terreux décrits dans le chapitre 1er, on obtient, pendant le passage des décharges électriques, des effets lumineux des plus brillants, et pour ainsi dire toutes les nuances prismatiques suivant les matières que l'on emploie; Ainsi le sulfure de calcium orangé donne, dans le tube, une belle couleur rouge, dont la teinte est un peu différente de celle émise par le sulfure après l'action lumineuse, en raison de la couleur violacée des rayons électriques eux-mêmes qui se mélange à la couleur orangée du corps. Le sulfure de strontium vert (obtenu avec le carbonate de strontiane ou par la réduction du sulfate), le sulfure de calcium vert légèrement bleuâtre ainsi que le sulfure de strontium bleu-violet, obtenu par l'action du soufre sur la strontiane anhydre, présentent des effets d'une grande puissance. Je signale ces quatre préparations, car pendant le passage de l'électricité la nuance des rayons électriques qui se mélange à celle que donne le corps fait que les tubes offrent des teintes orangées, vertes, bleues et violettes d'une grande netteté. En plaçant parallèlement à côté les uns des autres plusieurs tubes faisant partie du même circuit, comme le représente la fig. 35, ou bien en les faisant traverser par les décharges d'un puissant appareil d'induction, on peut, comme on l'a dit plus haut, les éclairer simultanément.

On pourrait également préparer des tubes ou des œufs électriques de plus grandes dimensions, et fixer avec de la gomme sur une partie de leur surface intérieure les substances phosphorescentes, et alors, tout en n'employant que peu de matière, on pourrait produire les effets lumineux dont il s'agit sur une plus grande étendue.

La quatrième préparation, le sulfure de strontium lumineux bleu violet, présente en outre cet effet remarquable, qui du reste va être indiqué

plus loin, qu'en abaissant sa température à — 20 degrés, il donne une nuance violette plus belle; à + 70 degrés, il paraît verdâtre, et en chauffant le tube vers 200 degrés la lumière émise serait jaune orangé. Ainsi la chaleur seule modifie l'état physique de ce sulfure.

L'effet lumineux est en général plus énergique près du pôle négatif, mais cette différence dépend de la substance phosphorescente; avec le sulfure de calcium orangé, elle est moins manifeste qu'avec le sulfure de strontium vert, où elle est très-marquée. Ce résultat tient à ce que les rayons qui impressionnent les différentes substances sont inégalement réfrangibles, et à ce que plus cette réfrangibilité est grande, plus l'inégalité d'action près des pôles est grande, puisque près du pôle négatif la couleur de l'arc est plus bleue que partout ailleurs. On observe également, par ce mode d'action, que le verre des tubes devient phosphorescent pendant le passage de l'électricité comme dans le phosphoroscope, et les rayons qu'il émet se mélangent à ceux qui proviennent de la matière phosphorescente; ceux qui proviennent de l'action directe des décharges électriques modifient également, ainsi qu'on l'a dit plus haut, la nuance que la matière présente quand elle est lumineuse seule.

J'ai observé qu'il n'était pas nécessaire que les tubes fussent munis de fil de platine pénétrant à l'intérieur pour que les décharges se succédassent et que les substances fussent rendues lumineuses; il suffit d'appliquer sur les deux extrémités d'un tube à air raréfié et renfermant un sulfure phosphorescent deux anneaux métalliques communiquant aux deux fils d'un appareil d'induction, pour que des décharges intérieures éclairent ce sulfure, quoique à un degré plus faible que lorsque les fils de platine pénètrent dans l'intérieur du tube. Ce phénomène très-curieux me paraît tenir à ce que la surface du verre conduit légèrement l'électricité, et à ce que le passage alternatif de cet agent sur le tube donne lieu à des décharges induites dans l'intérieur qui se manifestent par des rayons électriques et encore mieux par l'illumination des matières impressionnables. Le fait suivant me paraît appuyer cette manière de voir : si l'on rend la surface du verre plus conductrice en insufflant de l'air humide, l'effet lumineux intérieur augmente d'intensité. Ces résultats permettent de placer des corps dans l'intérieur de tubes contenant de l'air raréfié, et de les soumettre à l'action de l'électricité sans l'intermédiaire d'aucun fil métallique.

En mettant dans les tubes des substances telles que des petits tubes

fermés remplis d'une dissolution de chlorophylle, de bisulfate de quinine, ainsi que du nitrate d'urane et des cristaux de double cyanure de potassium et de platine, on obtient des effets lumineux de couleur rouge, bleu clair, verte, et bleue, mais seulement pendant le passage de l'électricité ; car lorsque l'action lumineuse cesse, ces matières redeviennent immédiatement obscures, comme on l'a expliqué dans le paragraphe précédent, ce qui n'a pas lieu avec les sulfures phosphorescents. Aujourd'hui on prépare ainsi pour les cours des tubes de formes très-diverses.

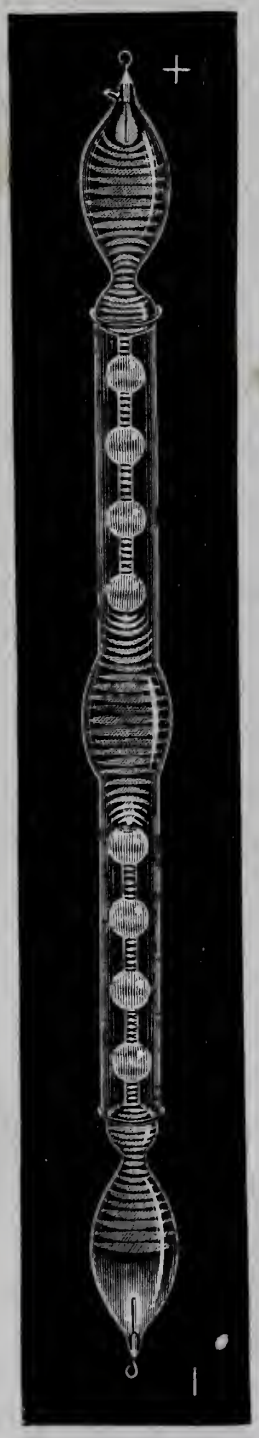


Fig. 36.

On se sert aussi de tubes à air raréfié dont certaines parties sont en verre d'urane et prennent une vive teinte verte au moment du passage de l'électricité; l'on forme avec ces tubes des circuits plus ou moins variés et même des lettres. La figure 36 représente un tube dont on a déjà parlé à propos de la lumière électrique, et dans lequel les petites boules intérieures, qui sont en verre d'urane, deviennent lumineuses vert, au moment du passage des décharges électriques.

On a dit antérieurement, page 178, que la lumière électrique dans le vide avait pu être utilisée dans certains cas spéciaux, comme par exemple pour la construction de lampes à l'usage des mineurs. C'est en repliant un tube capillaire sur lui-même en forme de serpentin que l'on obtient un cylindre de lumière pouvant être renfermé dans un tube plus résistant et capable de donner une certaine illumination quand ce serpentin transmet les décharges d'un appareil d'induction. Afin d'éviter l'emploi de gaz raréfiés, qui au bout d'un certain temps se décomposent, on fait simplement usage d'azote ; mais on construit le serpentin en verre d'urane, qui donne une lumière de teinte verdâtre due aux effets de phosphorescence, et dont l'intensité ne change pas.

Les appareils construits ainsi donnent une faible quantité de lumière, car leur pouvoir éclairant est un peu moindre que celui des lampes ordinaires des mineurs; mais ils ont l'avantage de ne pré-

senter aucun danger d'explosion, l'action calorifique qui se manifeste à l'extérieur du tube étant très-faible. On peut se servir également de ce mode d'éclairage dans d'autres circonstances, comme pour l'éclairage sous l'eau (1).

Au lieu d'employer des tubes à air raréfié, on peut introduire dans un œuf électrique ou sous une cloche placée sur une machine pneumatique, des corps comme les sulfures phosphorescents, le bisulfate de quinine et le verre d'urane; au moment où les décharges de l'appareil d'induction traversent l'air raréfié, ces corps émettent, par action propre, leur lumière phosphorique, et l'arc voltaïque conserve sa teinte violacée; c'est un effet lumineux très-curieux à observer.

On peut donner à l'expérience la forme indiquée ci-contre fig. 37 :

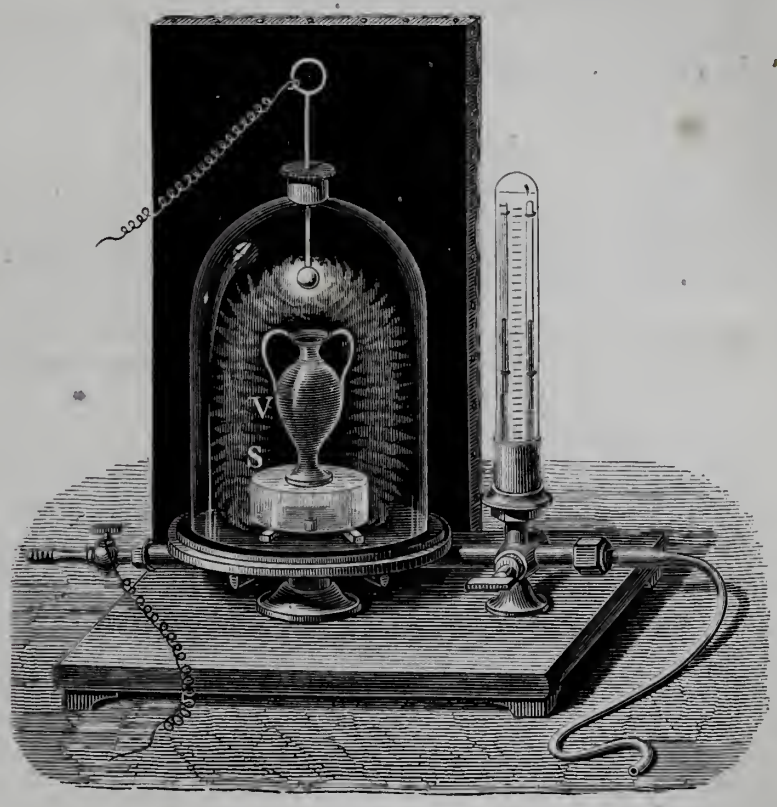



Fig. 37.

sur la platine de la machine pneumatique repose un soc en verre dont la surface est enduite de bisulfate de quinine; un vase en verre d'urane V repose sur le soc. Quand la décharge passe, et qu'elle produit comme une gerbe lumineuse ayant la teinte rouge violacée caractéristique de l'azote raréfié, le soc devient lumineux bleu et le vase lumineux vert.

(1) Voir la notice sur l'appareil d'induction, déjà citée, page 204, et *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale,* t. 11, p. 217, et 531, 1864.

On voit donc que ce mode d'expérimentation, joint à l'emploi des rayons violets obtenus avec les écrans, offre un des moyens les plus frappants que l'on puisse employer pour montrer les effets lumineux des corps qui ont la faculté de conserver pendant un temps plus ou moins long (et surtout dans ce dernier cas) l'action exercée par la lumière.

Je terminerai ce paragraphe en citant les noms des matières que l'on peut le plus généralement employer et dont les effets lumineux sont les plus tranchés pour les expériences qui viennent d'être indiquées :

*Corps solides à courte persistance.*

| | | |
|---|---|---|
| Verre d'urane, | lumière émise, | verte. |
| Azotate d'urane, | id., | verte. |
| Platino-cyanure de potassium, | lumière émise, | bleue. |
| Papier, carton ou verre enduit de bi-sulfate de quinine, | lumière émise, | bleue. |
| Certains cristaux de spath-fluor, | lumière émise, | bleu foncé. |

*Corps liquides à courte persistance.*

| | | |
|---|---|---|
| Dissolution de sulfate de quinine dans l'eau acidulée par l'acide tartrique ou sulfurique, | lumière émise, | bleue. |
| Dissolution aqueuse d'esculine, | lumière émise, | bleue. |
| Dissolution alcoolique de chlorophylle, | lumière émise, | rouge. |

*Corps solides à longue persistance.*

| | | |
|---|---|---|
| Sulfure de barium, | lumière émise, | orangée. |
| Sulfure de strontium, | id., | verte. |
| Sulfure de calcium, | id., | vert bleuâtre. |

# CHAPITRE IV.

*Composition de la lumière émise par les corps phosphorescents.*

## § 1. *Appareils employés.*

Pour étudier la composition de la lumière émise par les différents corps dont la phosphorescence a une durée plus ou moins longue, j'ai fait généralement usage du phosphoroscope décrit, chapitre II, page 249.

Cet appareil a été disposé de manière à pouvoir faire toutes les observations dont il va être question plus loin.

Il est nécessaire de le placer dans une chambre noire comme l'indique la figure 38 et d'ajuster la partie antérieure AB de la boîte qui

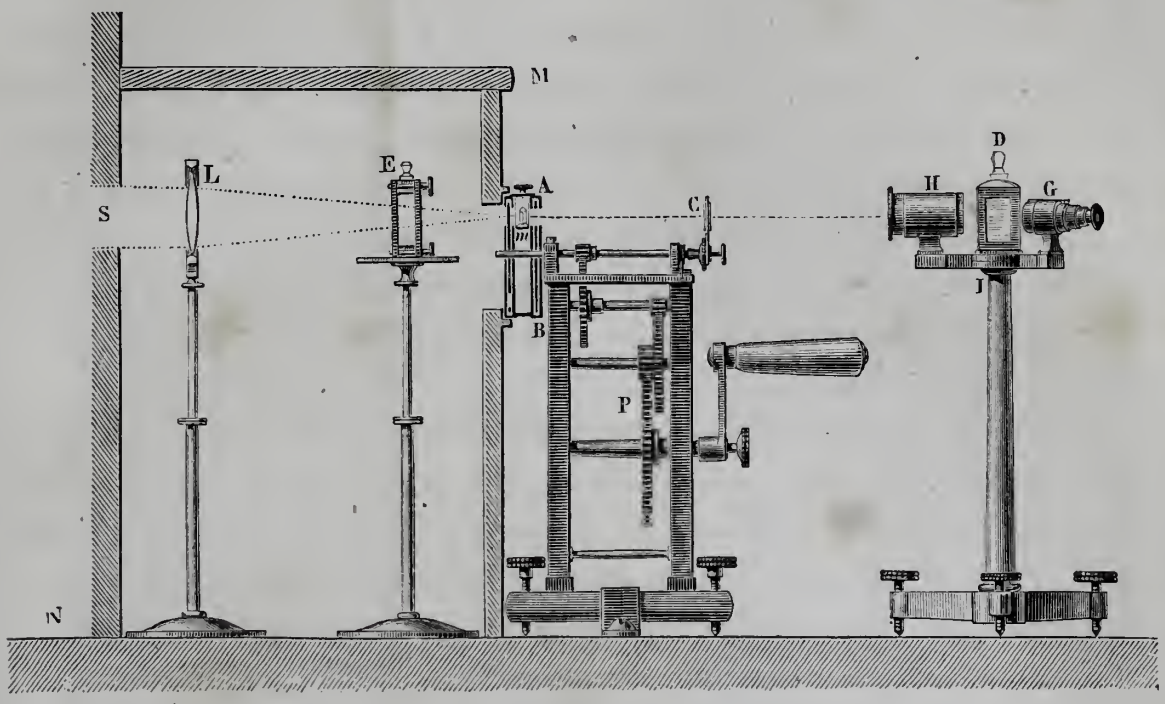



Fig. 38.

porte les disques mobiles dont les ouvertures ne se correspondent pas, sur le fond M d'une caisse en bois MN adaptée au volet, de façon qu'aucune trace de lumière diffuse ne puisse pénétrer jusqu'à l'observateur. D'un autre côté, le faisceau S de lumière solaire, après avoir été réfléchi sur le miroir d'un héliostat, est réfracté par une lentille à court foyer L qui concentre ainsi une assez grande quantité de lumière sur le corps *m* placé dans l'intérieur du phosphoroscope. La caisse MN est nécessaire pour éliminer toute trace de lumière diffuse qui nuirait aux observations. Telle est la disposition à prendre quand on agit avec la lumière blanche.

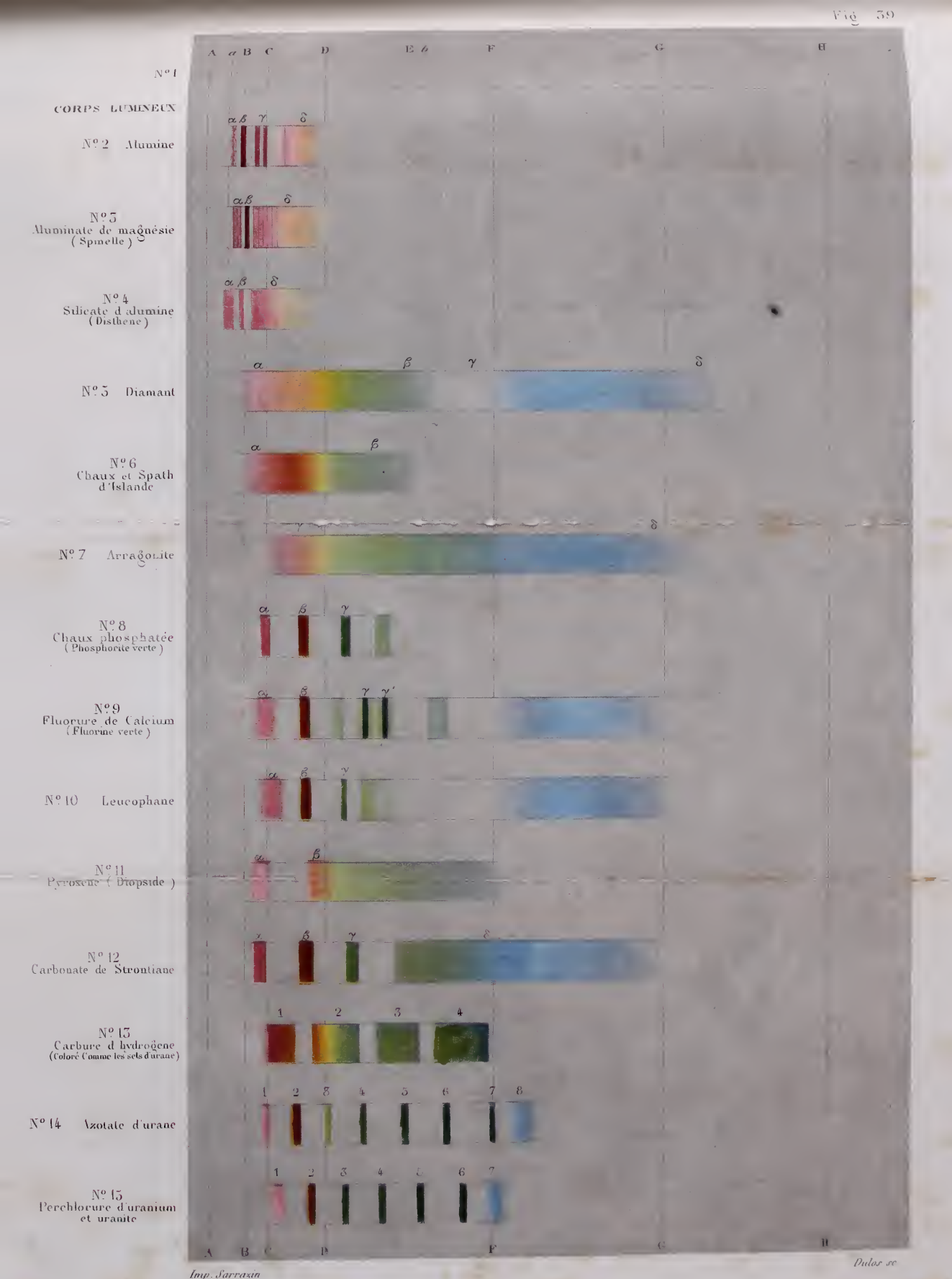
Lorsqu'on veut opérer avec des rayons d'une réfrangibilité déterminée, le moyen le plus précis consiste à réfracter un faisceau lumineux à l'aide d'un prisme et à éclairer le phosphoroscope à l'aide des rayons transmis. On peut encore placer sur la route des rayons, avant d'éclairer les corps, des écrans tels que E, formés par des cuves en glace remplies de liquides colorés, lesquels permettent d'agir seulement avec une portion déterminée du rayonnement solaire. Ainsi, un écran

obtenu au moyen d'une dissolution de sulfate de cuivre ammoniacal ne laisse passer que la partie la plus réfrangible de la lumière et comprise depuis la raie *b* du vert, un peu avant F du spectre solaire, jusqu'aux rayons extrêmes violets. Un écran fait avec une dissolution de bichromate de potasse ne laisse passer que le rouge, l'orangé et le commencement du vert, c'est-à-dire depuis A jusqu'à moitié de la distance de D à *b*. Si on fait usage de chromate jaune de potasse, une grande partie du vert est transmise, et la portion du spectre solaire qui passe a une étendue comprise depuis A jusqu'à $\frac{1}{3}$ environ de la distance de *b* à F; un écran de bichlorure de cuivre ne donne que la partie moyenne du spectre, ou le jaune, le vert et le commencement du bleu, c'est-à-dire depuis la moitié de la distance de C à D jusqu'au delà de F à $\frac{1}{6}$ de la distance de F à G.

L'appareil dont j'ai fait usage ne peut donner les effets de persistance d'impression lumineuse au delà de $\frac{1}{5000}$ de seconde. Dans la plupart des cas, cette limite est suffisante; cependant, je dois dire qu'il y a des corps, tels que diverses dissolutions de substances organiques et plusieurs platino-cyanures, dont la durée de persistance est moindre.

Ce phosphoroscope peut servir non-seulement à l'étude des matières transparentes ou translucides d'une certaine dimension, mais encore à celle des substances opaques; pour opérer avec ces dernières, il faut les réduire en poudre, en faire adhérer avec un peu d'eau une très-légère couche sur une lame de mica ou de quartz, et fixer cette lame au milieu de l'appareil. Le mica, comme le quartz très-limpide, n'ayant pas d'action appréciable, l'effet observé se rapporte à la matière déposée. On peut également placer les matières pulvérulentes entre deux petites lames de mica distantes de $\frac{1}{3}$ de millimètre environ, et formant une très-petite cuve ouverte à la partie supérieure.

Lorsque les substances sont lumineuses dans le phosphoroscope, on analyse la lumière émise avec un spectroscope disposé comme il suit : on place à quelque distance un prisme creux rempli de sulfure de carbone D, fixé sur un pied I et de façon que son arête soit verticale; une lunette G, qui se meut circulairement autour du prisme, permet d'étudier les différents éléments de la lumière transmise lorsque le prisme est dans la position du minimum de déviation. Un micromètre situé au foyer de l'oculaire de la lunette G sert à mesurer les intervalles des différentes parties lumineuses des spectres observés. Pour avoir une image prismatique bien nette et dont les éléments soient


A a B C D E b F G H
N° 1
CORPS LUMINEUX
N° 2 Alumine
N° 3 Aluminate de magnésie (Spinelle)
N° 4 Silicate d'alumine (Disthène)
N° 5 Diamant
N° 6 Chaux et Spath d'Islande
N° 7 Arragonite
N° 8 Chaux phosphatée (Phosphorite verte)
N° 9 Fluorure de Calcium (Fluorine verte)
N° 10 Leucophane
N° 11 Pyroxene (Diopside)
N° 12 Carbonate de Strontiane
N° 13 Carbure d'hydrogène (Coloré Comme les sels d'urane)
N° 14 Azotate d'urane
N° 15 Perchlorure d'uranium et uranite
Imp. Sarrazin
Dulos sc

suffisamment écartés, il faut que le corps lumineux *m* soit taillé sous la forme d'un prisme vertical long et étroit; sans cela, s'il n'a pas une forme régulière, on fixe en C une lentille cylindrique dont l'axe est vertical, et la réfraction en D s'opère comme si les rayons provenaient d'un faisceau lumineux mince et étroit.

Pour comparer les effets lumineux à ceux qui sont produits quand les rayons ultra-violets frappent certains corps, comme le bisulfate de quinine, on place en H une seconde lunette faisant collimateur et en avant de laquelle se trouve un écran muni d'une fente étroite ; on enlève alors le phosphoroscope, on fixe la matière sur l'écran H, et on l'éclaire vivement, soit à l'aide des rayons solaires qui ont traversé une couche d'une dissolution de sulfate de cuivre ammoniacal, soit avec les rayons ultra-violets du spectre solaire. En examinant au moyen de la lunette G, au travers du prisme D, les éléments lumineux transmis, on peut comparer les effets à ceux obtenus dans le phosphoroscope avec les autres corps : on verra plus loin, ainsi qu'on l'a énoncé dans le chapitre III, page 320, que lorsque les corps peuvent être rendus lumineux dans le phosphoroscope, et par l'action des rayons violets, la composition de la lumière émise est la même dans les deux circonstances.

La planche figure 39, qui renferme les images prismatiques obtenues en réfractant les rayons provenant de quelques substances, représente seulement l'effet produit quand ces substances sont excitées à l'aide de la lumière blanche ; ce n'est que dans le cours de ce chapitre que l'on indiquera les effets qui résultent de l'influence des rayons simples.

### § 2. *Alumine et ses combinaisons.*

L'alumine est une des matières les plus curieuses à examiner dans le phosphoroscope, en raison de la netteté et en même temps de la vivacité des effets qu'elle manifeste, et en outre de leur simplicité, car son action est la même, que la matière soit amorphe, fondue ou cristallisée, et ne présente pas plusieurs effets, comme les substances dont on parlera plus loin. D'un autre côté, cette matière entrant dans la composition d'un grand nombre de produits naturels et artificiels dans lesquels elle peut jouer le rôle d'acide ou de base, on peut suivre les modifications apportées dans son action propre.

Si l'alumine est précipitée d'une dissolution d'un sel d'aluminium, puis desséchée dans le vide pneumatique et par conséquent hydratée,

elle émet alors dans le phosphoroscope une lumière verdâtre, quelquefois assez faible, dont l'intensité dépend de son mode de préparation. Si la précipitation a été obtenue avec le chlorure d'aluminium dissous et l'ammoniaque, l'effet est plus marqué qu'en opérant avec les aluns ou le sulfate d'alumine.

Si l'alumine hydratée est calcinée pendant longtemps à une température élevée, elle devient anhydre et donne dans le phosphoroscope une action toute différente; elle est rouge foncé avec une nuance très-belle et très-pure, la plus rouge que l'on puisse obtenir avec les matières essayées jusqu'ici. On observe l'effet qu'elle produit en la fixant sur une lame mince de mica, et même en mettant une épaisseur de 1 millimètre d'alumine en poudre entre deux petites lames de cette substance; la translucidité de la matière est suffisante pour que celle-ci paraisse d'un beau rouge pendant l'action des rayons solaires.

Quoique l'alumine hydratée et calcinée à une température suffisamment élevée ait donné les mêmes effets, quelle que fût sa préparation, je dois dire que l'alumine qui provient de la calcination directe de l'acétate d'alumine a paru posséder un pouvoir plus énergique que celle provenant des aluns ou du chlorure; il est nécessaire néanmoins que la durée de l'action calorifique soit suffisante, car sans cela la teinte émise serait plus ou moins verte.

Après ce mode de préparation, qui donne des effets très-énergiques, je signalerai celui qui consiste à calciner l'alun ammoniacal, à laver le résidu et à calciner vivement une seconde fois la matière; du reste, dans ces diverses circonstances, quand l'alumine est pure, elle offre une émission de lumière dont la composition est toujours la même.

Si l'alumine est fondue ou qu'elle soit cristallisée, les effets ne changent pas, mais sont plus faciles à observer, les matières étant transparentes; ces substances prennent encore dans le phosphoroscope une belle nuance rouge. Dans cet état, les substances mélangées à l'alumine peuvent influer sur l'intensité lumineuse, mais non sur la nature de la lumière émise. Si l'alumine a été fondue avec l'oxyde de chrome et que la masse soit très-légèrement violacée, la lumière émise est beaucoup plus vive. Suivant la température à laquelle le corps a été soumis et peut-être la quantité d'oxyde de chrome contenu, on sait que l'on a des masses d'une nuance rose-violacée (rubis), bleue (saphir) et rouge-jaunâtre; ces différentes matières sont toutes lumineuses rouge dans

le phosphoroscope avec la même composition lumineuse que le coryndon artificiel parfaitement blanc.

J'ai essayé comparativement les pierres précieuses naturelles, telles que les coryndons blancs, les saphirs, les rubis, et j'ai observé des effets du même genre. Ces corps sont tous lumineux avec une belle nuance rouge, mais dont l'intensité est différente dans chaque cas, sans que l'on puisse dire d'où provient cette inégalité. En général les rubis ont une action plus vive que les autres coryndons; cependant il y a des rubis qui ont une action plus faible que d'autres : ceux qui ont une teinte rose-lilas sont presque toujours très-lumineux. Les coryndons blancs, les saphirs bleus, conduisent à la même conclusion. Ordinairement les rubis sont assez lumineux pour qu'ils présentent immédiatement cette couleur rouge dans les rayons ultra-violets, et sans qu'il soit nécessaire pour observer cet effet d'avoir recours au phosphoroscope.

La durée de la persistance de l'impression lumineuse avec l'alumine (coryndons, saphirs) est assez étendue lorsque l'intensité de la lumière incidente est grande. En tournant très-lentement la roue du phosphoroscope on voit aussitôt l'effet se produire; quand la roue du phosphoroscope fait un tour en dix secondes, on observe l'émission de lumière avec la plapart des échantillons, c'est-à-dire qu'il y a une persistance plus grande que $\frac{1}{100}$ de seconde. Lorsque le corps est vu après trois ou quatre millièmes de seconde, on arrive au maximum d'intensité, et la lumière n'augmente plus avec une vitesse plus grande de l'appareil. On a déjà parlé de ces effets page 260 et suivantes.

Si l'on transporte successivement le phosphoroscope dans les différentes parties d'un spectre solaire très-intense, on voit le coryndon devenir lumineux depuis l'extrême rouge jusque bien au delà du violet; le maximum d'action a lieu dans le commencement du vert, c'est-à-dire là où se trouve le maximum de lumière du spectre; très-près de ce maximum il y a un décroissement brusque d'intensité, et ensuite dans les rayons bleus, violets et au delà, l'action est moins intense. On voit que l'alumine conduit à ce résultat curieux qu'elle est impressionnée par toute la partie visible du spectre, en donnant lieu à des rayons qui sont toujours sensiblement de la même nuance.

En disposant sur la route des rayons de lumière blanche des écrans différemment colorés, on arrive à la même conclusion; les verres rouges, les écrans jaunes, bleus, laissent également impressionner l'a-

lumine, et la différence des effets ne paraît provenir, en grande partie, que de la différence dans l'intensité des rayons qui traversent ces écrans, abstraction faite de leur couleur.

Si l'on place l'un devant l'autre deux écrans, l'un en verre rouge, l'autre en verre bleu coloré par le cobalt, on sait que cette réunion ne laisse traverser que les rayons rouges extrêmes, c'est-à-dire la portion du spectre comprise entre les raies du spectre solaire lumineux A et B. Les rubis sont encore actifs à l'aide de cette lumière ainsi tamisée, mais ils le sont très-faiblement; ils émettent des rayons rouges qui traversent également un écran rouge du même genre. On voit donc, dans ce cas, que les rayons émis ont la même réfrangibilité que les rayons actifs et que la matière vibre pour ainsi dire à l'unisson des rayons qui l'impressionnent.

La coloration du rubis jointe à l'effet qui a lieu dans les rayons ultra-violets, fait peut-être supposer que la teinte de ce corps à la lumière du jour pourrait résulter en partie des rayons émis en vertu d'une action propre; je n'avance toutefois cette idée qu'avec une certaine réserve.

La composition de la lumière émise par l'alumine peut être reconnue au moyen de la disposition représentée plus haut fig. 38 en examinant à l'aide de la lunette G l'image du corps *m*, réfractée à l'aide du prisme D en sulfure de carbone. L'étude des images prismatiques a montré que l'alumine, les rubis, les coryndons, les saphirs, donnent la même composition lumineuse. L'effet produit est représenté planche fig. 39; le n° 1 indique la position des raies du spectre solaire lumineux qui servent de limites pour comparer les réfrangibilités des lumières émises.

On voit que le spectre de la lumière donnée par l'alumine présente quatre parties lumineuses, $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $\delta$, dont trois sont très-nettes et caractéristiques $\beta$, $\gamma$, et $\delta$. La première, $\alpha$, est très-faible et difficile à distinguer. La partie $\beta$ rouge est très-brillante, et se trouve tangente à la ligne B du rouge prismatique; elle est moins réfrangible qu'elle, et se trouve séparée de $\alpha$ par une petite bande obscure. $\beta$ est séparé de $\gamma$ par un certain espace peu lumineux, mais dans lequel se trouvent des raies noires. $\gamma$ est divisé nettement en deux parties, et enfin entre $\gamma$ et $\delta$ on observe un minimum de lumière.

D'un autre côté, si l'on impressionne l'alumine par les différents rayons du spectre, et qu'on analyse la lumière émise, on trouve toujours la même composition à cette dernière, pourvu que la partie active

reste comprise entre l'extrémité violette du spectre et l'orangé; dans le rouge du spectre actif, les parties $\gamma$ et $\delta$ disparaissent, et dans l'extrême rouge il n'y a plus que $\alpha$ et $\beta$ de visibles.

Il y a un autre moyen d'étudier la composition de la lumière émise; il consiste à prendre un rubis bien lumineux, et à le placer devant la fente verticale de la lunette H que l'on adapte à l'appareil I, fig. 38, page 335; on enlève le phosphoroscope P, et l'on projette simplement sur le corps la lumière solaire tamisée par un écran de sulfate de cuivre ammoniacal; aussitôt le rubis s'éclaire en rouge, et à l'aide du prisme et de la lunette on étudie la composition de la lumière : cette composition est semblable à celle que nous venons d'indiquer, si ce n'est que la partie $\delta$ est moins lumineuse qu'en employant le phosphoroscope. Il est facile de déterminer la position des raies du spectre solaire à l'aide du micromètre de la lunette avant l'interposition de l'écran bleu foncé; on peut alors, quand on fait usage de l'écran, connaître la position des bandes lumineuses $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $\delta$ par rapport aux raies du spectre. Je dois dire qu'en éclairant le rubis à l'aide de la partie ultra-violette du spectre on obtient les mêmes effets. L'analyse optique faite de cette manière indique au milieu de la partie $\alpha$ une ligne noire; entre $\beta$ et $\gamma$ il y a quatre petites lignes noires bien nettes. La bande obscure qui sépare $\gamma$ en deux parties est la réunion de plusieurs lignes noires que l'on n'a pas indiquées sur la figure, et enfin il y a apparence au moins de deux lignes dans la région $\delta$. Du reste, sur la planche fig. 39 on n'a représenté que les bandes lumineuses et les lignes noires les plus caractéristiques.

L'identité de composition lumineuse en opérant avec le phosphoroscope ou avec la lumière ultra-violette est très-remarquable; elle vient confirmer cette proposition, déjà établie antérieurement, que les effets lumineux donnés par le sulfate de quinine, la chlorophylle et étudiés chap. III, page 316, ne sont autres que des effets de phosphorescence de courte durée. On retrouvera plus loin cette identité d'effets avec les sels d'urane et d'autres matières.

On peut employer une autre disposition pour établir la position des parties brillantes et celle des raies noires du spectre de la lumière émise, par rapport aux raies du spectre solaire : on fixe dans le phosphoroscope sur le corps *m*, fig. 38, un petit fragment de nitrate d'urane; on voit alors dans la lunette G deux spectres superposés; l'un, à la partie inférieure, est celui donné par le corps *m*; l'autre, au-dessus, est le spectre

du nitrate d'urane représenté n° 14 et formé par des bandes lumineuses bien définies de position. Le micromètre de la lunette indique les rapports des distances entre ces bandes lumineuses et celles des corps, et l'on peut fixer leur position comme on l'a fait sur la pl. fig. 39.

En somme, comme on le voit, ces différents effets lumineux tiennent donc bien à la nature des molécules d'alumine, et non pas à des substances étrangères mélangées, puisque les coryndons plus ou moins mélangés d'éléments étrangers offrent les mêmes effets que l'alumine pure (1).

Il était important d'étudier les diverses combinaisons de l'alumine, pour observer comment, dans le groupement moléculaire, le caractère particulier de chaque corps se trouve conservé. On a indiqué dans le tableau suivant la teinte des corps vus par diffusion avant d'analyser les effets dans le phosphoroscope, ainsi que la couleur de ces corps vus directement dans l'appareil.

(1) Parmi le très-grand nombre de coryndons et de saphirs que l'on m'a prêtés et que j'ai essayés, il s'est trouvé quelques pierres bleues qui n'ont pas offert de lumière rouge dans le phosphoroscope, mais seulement quelques traces de lumière verdâtre. L'examen approximatif que j'en ai fait m'a porté à croire que ces minéraux ne sont pas des saphirs; mais, n'ayant pu les analyser, je ne puis pas présenter une conclusion affirmative dans ce sens, et décider si dans quelques cas des substances étrangères mélangées à l'alumine ne pourraient pas changer la nature de la lumière émise, comme on l'observe lors de l'hydratation de cette matière.

| COMPOSÉS ALUMINEUX. | | | ÉTAT DU CORPS. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE dans le phosphoroscope. |
|---|---|---|---|---|
| Alumine... | | Coryndon, rubis, saphir. | Transparent incolore ou coloré en rouge, violet ou bleu. | Rouge très-pur et vif. |
| Aluminates. | | De magnésie (spinelle). | Transparent rouge ou violet. | Rouge très-pur et vif. |
| | | De glucine (cymophane). | Transparent verdâtre. | Jaune orangé avec la cymophane artificielle; lumière très-faible avec la cymophane naturelle. |
| | | De zinc (gahnite). | Opaque. | Aucun effet appréciable. |
| | | De potasse et de soude (verre alumineux). | Transparent. | Jaune verdâtre. |
| Silicates d'alumine. | Anhydres.. | Disthène. | Translucide. | Rouge très-pur et vif. |
| | | Andalousite. | Légèrement translucide ou opaque. | Rouge très-pur et vif. |
| | | Sillimanite. | Translucide. | Rouge (teinte très-faible). |
| | Hydratés... | Halloysites, argiles, etc. | Opaque. | Inappréciable ou verdâtre très-faible. |
| Silico-fluate d'alumine..... | | Topaze. | Transparent jaune ou rose. | Rouge très-pur. |
| Silicates alumineux et alcalins. | Anhydres.. | Feldspath adulaire. | Transparent. | Quelques échantillons sont rouge très-faible, d'autres à peine visibles. |
| | | Orthose, albite, etc. | Opaque. | Aucun effet appréciable. |
| | | Amphygène, etc. | Transparent. | Verdâtre très-faible. |
| | Hydratés... | Mésotype, apophyllite, etc. | Translucide. | Quelquefois verdâtre faible, la plupart du temps aucun effet appréciable. |
| Silicates d'alumine et de chaux ou à base terreuse. | Anhydres.. | Grenat, euclase, cordiérite. | id. | Aucun effet appréciable. |
| | | Émeraude. | id. | Quelquefois action très-faible. |
| | | Anortite. | id. | Rouge orangé faible. |
| | | Harmotome. | id. | Jaune verdâtre. |
| | Hydrate.... | Prehnite. | id. | Jaunâtre. |
| Fluorure double d'aluminium et de sodium.; Cryolite. | | | id. | Verdâtre très-faible. |
| Sels à base d'alumine. | | Chlorure d'aluminium. | id. | Aucune action appréciable. |
| | | Sulfate d'alumine. | id. | Verdâtre très-faible. |
| | | Alums de potasse et d'ammoniaque. | Transparent. | Verdâtre très-faible. |

On reconnaît d'après l'ensemble de ces effets que dans les composés où l'alumine joue le rôle de base, tels que les sulfate, chlorure, fluorure et même avec l'hydrate d'alumine, on n'observe qu'une émission de lumière verdâtre et nullement la coûleur rouge caractéristique indiquée précédemment. La combinaison de l'alumine avec la silice se présente sous d'autres conditions, car avec le disthène comme avec l'andalousite, qui sont des silicates d'alumine anhydre, la lumière émise est d'un rouge très-pur; la sillimanite ne donne qu'un effet beaucoup plus faible; quand le silicate d'alumine est hydraté, cet effet disparaît. La silice semble donc se comporter ici comme un acide ne neutralisant pas tout à fait l'action lumineuse de l'alumine, à moins que ce résultat ne soit dû à ce que la silice ne présente aucun effet lumineux appréciable à nos moyens d'expérimentation.

Avec les aluminates on observe une action du même genre, si ce n'est que la base modifie profondément l'action de l'alumine. Ceux à base de potasse, de soude, sont verdâtres, comme la soude et la potasse; au contraire, celui de magnésie (spinelle) est aussi lumineux rouge que le rubis. Il faut remarquer que dans ce dernier cas l'alumine est combinée avec une base (la magnésie) dont l'affinité pour elle est assez faible, et d'un autre côté que la magnésie elle-même donne une émission de rayons rouges quand elle est placée dans le phosphoroscope. L'aluminate de glucyne naturelle (cymophane) est à peine lumineuse; la cymophane artificielle donne au contraire une faible lueur jaune-orangée.

La plupart des silicates alumineux et alcalins, tels que les feldspaths, ne donnent plus de lumière rouge; le silicate d'alumine anhydre ayant une action très-nette et facile à reconnaître, du moment que les lueurs émises n'offrent plus la teinte rouge, on doit en conclure que dans les combinaisons telles que les feldspaths, l'alumine est probablement combinée avec la soude ou la potasse sous forme d'aluminate, et que la silice se trouve mélangée à ce dernier corps ou combinée avec lui. Du reste, en faisant fondre de l'alumine avec du verre, si la proportion de verre dépasse 8 à 9 dixièmes, on obtient des masses fondues et translucides dans lesquelles on a beaucoup de peine à retrouver l'action caractéristique de l'alumine; cette dernière forme avec l'alcali que contient le verre de l'aluminate de potasse ou de soude dont la lumière émise est verdâtre, et le mélange de ce corps avec le verre fondu donne lieu à une masse phosphorescente présentant une

nuance jaune-verdâtre bien différente de la nuance rouge du silicate d'alumine. Cependant le spectre obtenu avec la lumière émise par un verre contenant 8 parties de verre pour 2 d'alumine est presque aussi long que le spectre solaire lumineux, si ce n'est que la partie jaune et verte est moins brillante; à l'extrémité rouge on retrouve deux parties lumineuses qui correspondent aux espaces $\beta$ et $\gamma$ du n° 2 de la fig. 39 relatifs à l'alumine.

Dans les silicates d'alumine où il entre de la chaux et de la baryte, le caractère propre de ces dernières bases se retrouve (couleur jaune ou jaune orangé), et l'effet caractéristique de l'alumine est pour ainsi dire détruit comme dans les feldspaths.

En somme, quatre substances donnent une émission de lumière rouge que l'on pourrait confondre de prime abord : ce sont : 1° l'alumine (coryndon); 2° l'aluminate de magnésie (spinelle); 3° le silicate de magnésie anhydre (disthène, andalousite et sillimanite); 4° la topaze. Mais si dans le phosphoroscope l'action paraît la même, l'analyse de la lumière par réfraction suffit, comme on va le voir, pour montrer les différences qui existent entre elles.

*Spinelles.* — Les spinelles ont en général la même couleur que les rubis, et dans le phosphoroscope l'effet lumineux a la même nuance et la même durée de persistance appréciable; mais la composition de la lumière émise est différente. Tandis que le spectre de l'alumine n° 2 est caractérisé par les trois espaces brillants $\beta$, $\gamma$ et $\delta$ très-nets et bien espacés, celui du spinelle paraît former une seule image $\alpha$, $\beta$, $\delta$, n° 3, traversée par deux bandes noires fortes et nettement arrêtées, et composées elles-mêmes d'une réunion de raies noires placées très-près l'une de l'autre. La partie brillante $\beta$, qui sépare ces deux bandes, est un peu moins large et un peu moins réfrangible que la bande brillante $\beta$ du spectre de l'alumine : elle est partagée exactement en deux par une raie noire, et cette réunion des deux raies brillantes rouges très-voisines rappelle la réunion des deux raies jaunes qui constituent la raie D de la flamme du sodium. Dans l'image spectrale de l'alumine, la partie $\beta$ est moins réfrangible que la raie B du spectre lumineux, tandis qu'avec le spinelle elle l'est davantage. Si l'on superpose dans le phosphoroscope un coryndon et un spinelle, on voit simultanément les deux spectres représentés n° 2 et 3, et les deux parties brillantes $\beta$ sont très-près l'une de l'autre, mais ne se correspondent pas. Si la lumière émise est intense, on distingue d'autres raies noires : parmi

celles que l'on voit nettement il y en a deux très-fines dans la partie α, puis cinq dans la partie δ : ces dernières sont équidistantes, à l'exception de la deuxième et de la troisième. La traînée lumineuse se prolonge un peu vers D, et donne une trace de lumière jaune verdâtre.

Tel est l'effet obtenu avec les petits spinelles octaèdres ou bien avec les fragments de spinelles cristallisés naturels. J'ai remarqué que des petits spinelles roulés ont donné un spectre moins net, sans indication bien définie des deux raies 6, et quelquefois avec une bande de lumière verte et bleuâtre ; je pense que ce dernier effet provient de ce que les corps peuvent renfermer soit de l'eau, soit un alcali. D'un autre côté, si l'aluminate de magnésie a un excès d'alumine, les effets des deux substances se superposent, et les raies peuvent disparaître.

Les spinelles violets, comme les rubis, sont lumineux rouge dans les rayons ultra-violets ; aussi, peut-on placer, comme ces derniers, les cristaux de spinelle devant la fente disposée à l'extrémité de la lunette d'un spectroscope, et en les éclairant avec la lumière bleue ou violette obtenir un spectre bien net : ce spectre offre les raies et bandes indiquées plus haut.

Si l'on prépare l'aluminate de magnésie par le mélange d'une dissolution d'alun ammoniacal et de sulfate de magnésie dans laquelle on précipite l'alumine et la magnésie par l'ammoniaque, et qu'on élève à la température rouge le précipité, on a une matière qui les a propriétés lumineuses du spinelle.

*Disthène.* — Le disthène cristallisé, taillé en lamelles, blanc ou bleu, produit le même effet et offre la même composition lumineuse dans les deux cas. La quantité de lumière émise étant moindre qu'avec les deux substances précédentes, il est plus difficile d'étudier sa composition; on reconnaît cependant, comme avec le spinelle, un espace lumineux α δ, représenté n° 4 sur la fig. 39, séparé par deux bandes obscures 6, lesquelles partagent le spectre en trois, α, 6, δ; mais la partie lumineuse 6 est plus large avec le disthène qu'avec le spinelle et n'est pas située à la même place; elle correspond exactement à la partie lumineuse 6 du coryndon. En outre, les deux espaces noirs apparaissent moins nettement découpés. L'andalousite donne des effets analogues à ceux que produit le disthène, mais avec moins d'intensité ; la sillimanite est encore moins lumineuse, quoiqu'avec la même nuance. Quant à la staurotide, qui est toujours très-colorée et qui contient une grande quantité de fer, elle n'a donné aucune action appréciable.

*Topaze.* — Les cristaux de topazes jaunes, roses, blanches du Brésil ou de Sibérie, donnent, comme les substances précédentes, une belle couleur rouge dans le phosphoroscope; la nuance est beaucoup moins vive qu'avec le rubis et le spinelle et est peut-être un peu moins intense que celle donnée par le disthène. Mais, tandis qu'avec les trois substances précédentes la durée de la persistance de l'impression lumineuse est plus grande que $\frac{1}{100}$ de seconde, avec la topaze la lumière ne commence à être visible qu'en tournant assez rapidement le phosphoroscope, ce qui donne 2 à 3 millièmes de seconde pour limite de la durée au delà de laquelle on n'a plus d'émission lumineuse; le maximum d'effet est obtenu avec une vitesse qui conduit à observer le corps $\frac{1}{1000}$ de seconde après l'action de la lumière. Ainsi, avec ce corps, la durée de la persistance est moindre qu'avec les trois composés précédents. Quant à la composition de la lumière émise, elle se rapproche beaucoup de celle du disthène, et l'image vue avec un prisme n'a qu'une seule partie visible comprise entre les mêmes limites, mais sans apparence de bandes et de raies, peut-être en raison de la faible intensité lumineuse.

Toutes les topazes qui ont été étudiées n'ont pas présenté l'effet de lumière dont il est question; les topazes cristallisées rouge, rose, jaune plus ou moins pâle, ont donné une émission de lumière rouge, mais les topazes blanches roulées du Brésil n'ont offert aucune action appréciable : ce résultat tient à ce que l'effet est beaucoup trop faible pour être manifeste, ou bien à ce que l'on a désigné sous le nom de topaze roulée un autre minéral que la topaze prismatique proprement dite, ou une substance ayant une composition chimique différente.

L'analogie frappante des effets de la topaze cristallisée et du disthène, et l'observation faite avec le double fluorure d'aluminium et de sodium et avec les sels d'alumine, lesquels montrent que la teinte caractéristique rouge de l'alumine est détruite, conduisent à admettre que l'alumine dans la topaze est à l'état de silicate, et que le fluorure n'intervient pas dans la production des effets lumineux; il résulte de là que le disthène et la topaze, sous le rapport de la lumière émise, paraissent être des minéraux très-voisins l'un de l'autre.

Les quatre substances dont on vient de parler, l'alumine, le silicate d'alumine, l'aluminate de magnésie et la topaze, sont impressionnables entre les mêmes limites de réfrangibilité du spectre, c'est-à-dire depuis l'extrême rouge jusqu'au delà du violet et conduisent aux mêmes

observations que celles faites avec le coryndon; seulement, avec le spinelle il y a au commencement du bleu du spectre un espace où il semble que la matière soit moins impressionnée qu'en deça et qu'au delà; il y aurait donc en cet endroit un minimum d'intensité du spectre actif sur le spinelle.

On a vu plus haut que les sels à base d'alumine n'avaient qu'une action assez faible dans le phosphoroscope, et que les aluminates alcalins étaient dans le même cas; on pourrait alors attribuer le peu d'action des silicates alumineux et alcalins à ce que l'alumine, dans ces derniers corps, est à l'état d'aluminate.

Les argiles n'offrent aucune action appréciable; mais quand elles sont fortement calcinées, elles donnent une lumière jaunâtre, peut-être par la présence du verre résultant de la fusion de la silice au moyen de la potasse qui se trouve ordinairement dans les argiles. Tel est l'effet produit en particulier avec la porcelaine qui donne une teinte jaune dans le phosphoroscope.

Il y a encore deux minéraux alumineux que l'on doit citer, et qui ne donnent aucun effet : ce sont la tourmaline et l'axinite (silico-borates d'aluminé), dont la composition est, comme on le sait, fort compliquée ; le dernier corps surtout est à signaler, car il renferme une assez forte proportion d'alumine et de chaux.

### § 3. *Diamant.*

Le carbone à l'état de diamant est doué d'une action remarquable; cet effet tient évidemment à la constitution moléculaire de ce corps, puisque le charbon ordinaire ne jouit pas des mêmes propriétés.

Si l'on expose à l'action des rayons solaires des diamants naturels ou des diamants taillés, et qu'on vienne à les présenter à l'observateur dans une chambre noire, un très-grand nombre de ces diamants (en général moitié) paraissent phosphorescents, et tous ceux que j'ai examinés offrent une émission de lumière jaune plus ou moins vive, quoiqu'en général très-faible, mais assez persistante, puisqu'elle peut durer plus d'une heure. Cependant, les diamants qui ne présentent pas d'effets par ce mode d'action peuvent devenir actifs quand on fait usage de la lumière des décharges électriques excitées très-près de ces corps, comme on l'a dit plus haut, page 326. Après la cessation des décharges, ils offrent une faible lumière jaunâtre qui n'est pas sensible

sous l'influence solaire, en raison de l'intensité moindre de la lumière active; en opérant ainsi je n'ai pas trouvé de diamants taillés ou non qui n'aient présenté des effets lumineux, les uns étant plus actifs que les autres, sans reconnaître les motifs de cette différence.

Lorsqu'on place les diamants dans la partie ultra-violette du spectre solaire, ou bien lorsqu'on les examine à l'aide des décharges électriques excitées dans l'air raréfié, un certain nombre d'entre eux s'illuminent avec une teinte bleue analogue à celle que produit le sulfate de quinine, d'autres ne semblent pas donner d'action appréciable. Les diamants qui offrent cet effet particulier sont en général ceux qui sont les plus lumineux jaune après l'action du rayonnement et comme on vient de le voir plus haut. L'arrangement moléculaire qui donne lieu à l'émission de la lumière bleue dans un certain nombre de diamants est telle, que ceux-ci vus à la lumière diffuse ont une légère teinte bleuâtre, et dans un diamant que j'ai eu entre les mains l'effet était si énergique, que la teinte générale du corps à la lumière du jour était bleue clair.

Si l'on place ces diamants dans le phosphoroscope, et qu'on les éclaire vivement au moyen des rayons solaires, on observe les effets suivants : en général, par un mouvement lent des disques de l'appareil, ils deviennent lumineux avec une teinte jaune légèrement orangée; tous ceux qui sont moyennement phosphorescents conservent cette teinte jaune, quelle que soit la vitesse du phosphoroscope, et même quand les disques font 400 révolutions par seconde, c'est-à-dire lorsque le temps qui sépare le moment où l'on voit le corps de l'instant où il est frappé par la lumière blanche est environ $\frac{1}{2}$ millième de seconde.

Les diamants bien lumineux ne sont jaunes-orangés que par une faible vitesse des disques du phosphoroscope, et la lumière change avec la vitesse de rotation de façon à passer à une teinte bleu clair en présentant des nuances violacées intermédiaires. Parmi ceux-ci, quelques-uns n'offrent jamais qu'une lumière violacée, quelle que soit la vitesse des disques jusqu'à la limite que l'on a pu atteindre, peut-être parce que les rayons jaunes et bleus, émis en même temps, ont à peu près la même intensité et que l'on observe la teinte composée résultant de leur réunion; d'autres diamants sont d'abord jaunes, mais deviennent complétement bleu clair en imprimant une certaine vitesse à l'appareil, de sorte que l'intensité de la lumière bleue est bien supérieure à celle de la lumière jaune. Parmi ces derniers, j'en ai vu

qui sont jaune orangé quand on tourne lentement le phosphoroscope, puis qui deviennent bleuâtres quand la vitesse du disque est de cent tours par seconde, et dont la teinte est tout à fait bleue lorsque cette vitesse est double. Ainsi, dans ce cas la durée de la persistance de la lumière bleue paraît inférieure à $\frac{1}{1000}$ de seconde, et elle n'est pas appréciable après $\frac{1}{200}$ ou $\frac{1}{300}$; la lumière jaune, au contraire, peut se prolonger pendant plusieurs minutes. Du reste, on ne peut préciser la durée exacte de la persistance lumineuse, car, d'après ce qui a été dit antérieurement, la limite jusqu'à laquelle s'étendent les effets perceptibles dépend de l'intensité des rayons actifs.

On ne peut prévoir *a priori* quels sont les diamants qui offrent ce curieux changement de teinte dans le phosphoroscope suivant la vitesse de l'appareil, car la durée de la persistance de la lumière bleue est très-variable. Je citerai entre autres les résultats suivants : Deux diamants taillés faisant partie d'une parure étaient à peu près aussi lumineux l'un que l'autre après les avoir exposés à la lumière solaire avant de les transporter dans la chambre noire; ils étaient également bleus dans la partie ultra-violette du spectre, et cependant placés dans le phosphoroscope l'un est resté jaune orangé, quelle que soit la vitesse de cet appareil, et l'autre est devenu bleu clair comme ceux dont j'ai parlé plus haut; la durée de la persistance de la lumière bleue est donc différente avec chacun d'eux. D'un autre côté, un diamant translucide appartenant au Muséum d'histoire naturelle et formé par une agglomération de petits cristaux disposés en tous sens, diamant qui est légèrement bleuâtre au jour et très-lumineux bleu dans les rayons ultra-violets, est devenu presque immédiatement bleu dans le phophoroscope. Avec une vitesse supérieure à celle qui donne $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde à la persistance de l'impression lumineuse, on a distingué à peine une teinte verdâtre suffisante néanmoins pour montrer l'émission d'une faible quantité de lumière jaune; mais aussitôt que l'appareil a tourné un peu plus rapidement, et pour une durée de persistance inférieure à $\frac{1}{4}$ de seconde, le cristal est devenu bleu, et son maximum d'action a paru atteint vers $\frac{1}{1000}$ de seconde.

On voit, d'après cela, que le diamant présente deux effets lumineux bien tranchés : d'abord une lumière jaune-orangée plus ou moins vive que l'on observe avec tous les échantillons essayés, et qui semble tenir à la constitution moléculaire du corps; cette lumière a une intensité

et une persistance plus ou moins grandes, en vertu d'une cause qui n'est pas encore connue; en second lieu, une lumière bleue dont l'intensité peut être très-vive, dont la persistance est également variable, et qui est en général d'une durée ne dépassant pas $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ de seconde. Comme ce second effet lumineux ne se manifeste pas avec tous les diamants et peut même manquer complétement, ce qui n'a pas lieu pour la lumière jaune, on est porté à croire qu'il dépend d'un état physique particulier qui n'est pas essentiel à la constitution du corps.

Ces effets lumineux ne résultent pas d'une émission de rayons simples, et les teintes jaunes et bleues sont des teintes composées par la la réunion de rayons différemment réfrangibles. L'analyse de la lumière par réfraction met ce fait en évidence : si un diamant est assez fortement lumineux jaune, et qu'on tourne lentement le phophoroscope, on voit une image $\alpha\beta$ (n° 5 de la planche fig. 39), sans apparence de lignes noires, et qui correspond à la partie la moins réfrangible du spectre depuis le rouge orangé C jusqu'au milieu du vert. Quand on augmente la vitesse de rotation, cette partie du spectre ne change pas, mais une seconde trace lumineuse $\gamma\delta$ s'ajoute à la première; elle est verdâtre d'un côté, puis tourne au violet de l'autre. Le spectre total, qui est assez étendu, se compose alors de $\alpha\beta\gamma\delta$ avec un minimum d'intensité au milieu du vert près de F, à un tiers environ de la distance FD. Ces deux parties $\alpha\beta$, $\gamma\delta$ ont des intensités comparatives bien différentes suivant les échantillons essayés; si le diamant ne présente pas de teinte bleue pour une certaine vitesse du phosphoroscope, la seconde partie du spectre $\gamma\delta$ n'est pas appréciable.

On reconnaît encore au moyen de l'analyse de la lumière émise que lorsque la lumière bleue se produit, l'intensité lumineuse totale ne fait qu'augmenter et la lumière jaune primitive existe toujours. Ces résultats montrent donc que des vibrations de vitesse différente n'ayant pas la même persistance peuvent exister simultanément dans le même corps sans se nuire, et ne se manifestent pas successivement après l'action lumineuse incidente. Ce résultat pouvait être prévu : car si l'on réfléchit au jeu de l'appareil, on doit comprendre que les vibrations excitées dans le corps subsistent même sous l'action de la lumière incidente, et dès lors, du moment que l'on fait tourner l'appareil de plus en plus vite, ce sont les vibrations dont la persistance est la plus longue qui doivent se présenter d'abord; les autres n'apparaissent que successivement, mais doivent exister en même temps que les premières.

Les effets précédents ont été obtenus en éclairant les diamants avec la lumière blanche; il est important d'examiner comment ils se modifient en se servant de rayons d'une réfrangibilité parfaitement déterminée. Les résultats ont alors moins de netteté, car cette substance est loin d'être aussi lumineuse que les matières dont il sera question dans les paragraphes suivants; néanmoins, on a pu constater d'abord, en éclairant successivement les diamants placés au milieu du phophoroscope par les différents rayons d'un spectre solaire d'une petite étendue et très-intense, que les limites des rayons actifs étaient différentes pour chacun d'eux. Les diamants lumineux jaune et ceux jaune et bleu sont impressionnables depuis D ou E environ, c'est-à-dire depuis le jaune prismatique jusqu'au delà du violet; ceux qui sont faiblement jaunes et fortement bleus ont présenté une limite du côté des rayons les moins réfrangibles qui n'est pas aussi rapprochée du rouge; elle a paru être voisine de F. En faisant tourner lentement ou rapidement l'appareil, l'effet jaune-orangé a été sensible dans toute l'étendue de la partie active sur les diamants examinés, tandis que l'effet bleu n'a été manifeste que depuis la raie F du bleu, jusque dans les rayons ultra-violets.

Supposons donc qu'un diamant capable de présenter le changement de nuance de l'orangé au bleu soit fixé dans le phosphoroscope et qu'on promène l'appareil dans le spectre solaire en pénétrant par le violet et en marchant du côté du rouge; on trouve alors qu'avec le maximum de vitesse de l'appareil le diamant est bleu dans le violet et le bleu, puis que sa nuance change et passe au jaune, et plus loin tourne à l'orangé à mesure que l'on s'approche de l'orangé du spectre solaire.

On peut manifester d'une autre manière l'action des rayons de diverse réfrangibilité : il suffit, comme on l'a dit à propos de l'alumine, de placer sur la route des rayons solaires qui éclairent le corps *m* (fig. 38, page 335), des écrans E formés avec les liquides cités page 336 ; l'écran contenant une dissolution de chromate jaune de potasse ne donne au diamant que la coloration orangée jaune; l'écran bleu, au contraire, lui donne les deux nuances à peu près comme la lumière blanche.

On voit d'après cela que non-seulement le diamant rendu actif émet des rayons différemment colorés dont la persistance est inégale, mais encore que ces rayons peuvent être excités par différentes parties du rayonnement lumineux : ces rayons peuvent être produits tous sous l'influence des rayons les plus réfrangibles, mais à mesure que la ré-

frangibilité des rayons actifs diminue, la quantité de rayons donnés par le corps diminue en même temps que sa couleur change, de sorte que la longueur d'onde de la lumière émise n'est pas plus petite, mais se trouve au moins égale et en général plus grande que celle de la lumière incidente. Cela ne veut pas dire que la limite de l'action du spectre soit donnée par la couleur de la lumière la moins réfrangible qui soit émise, c'est-à-dire qu'un corps donnant de la lumière où se trouve de l'orangé doive être excité par l'orangé du spectre, car les rayons verts, bleus, etc., peuvent exciter des rayons orangés dont la longueur d'onde est plus grande; mais on doit conclure de ce qui précède que si les rayons orangés sont actifs, ils ne pourront donner tout au plus que de l'orangé et du rouge, et non pas du vert ou du bleu.

Ces conclusions résultent des études entreprises avec les différentes substances examinées dans le phophoroscope, et sont plus faciles à déduire des résultats obtenus avec des corps tels que l'hydrate de potasse et le fluorure de calcium, comme on le verra plus loin, que de ceux présentés par le diamant.

On doit remarquer encore que les deux principales teintes de la lumière émise par le diamant sous l'influence de la lumière blanche paraissent être complémentaires. Il est vrai que ces teintes résultent du mélange de diverses lumières, et qu'il n'est pas certain, d'après ce qui vient d'être dit, qu'il n'y ait que deux limites à la persistance des différents rayons; comme cette observation s'applique également à des corps tels que le carbonate et le silicate de chaux, il est possible qu'elle ne soit pas accidentelle et qu'elle tienne à la cause en vertu de laquelle ces phénomènes ont lieu, cause qui n'est pas encore bien connue.

### § 4. *Composés à base de calcium.*

Les composés de calcium sont intéressants à étudier en raison de l'intensité des effets qu'ils présentent et parce que la chaux semble donner à la plupart d'entre eux la faculté d'émettre de préférence des rayons jaunes et orangés. La chaux est par elle-même assez fortement lumineuse; dans les conditions ordinaires elle ne donne pas d'effets bien sensibles, mais en la calcinant dans un fourneau à vent elle acquiert une certaine translucidité, et devient lumineuse jaune orangé dans le phosphoroscope. La lumière qu'elle émet, quoique peu vive, peut être

analysée avec un prisme; on reconnaît alors qu'elle a une réfrangibilité comprise entre les raies C et E du spectre solaire ; elle contient donc en abondance les rayons orangés et jaunes et le commencement du vert, mais sans apparence de bandes noires séparant les espaces lumineux, comme avec l'alumine et quelques-unes des combinaisons de cette substance.

Si l'on examine les différents sels de chaux, on trouve que la plupart d'entre eux sont lumineux; tels sont le nitrate, l'oxalate, etc., qui donnent une lumière verdâtre de peu d'intensité; quant au sulfate, surtout le sulfate hydraté (gypse), il ne présente qu'un effet à peine appréciable. Certaines combinaisons de chaux, naturelles ou artificielles, sont douées d'une action énergique; tels sont le carbonate, le phosphate et le fluorure de calcium ; nous allons passer successivement en revue ces différentes combinaisons, afin de montrer dans cette classe de corps combien peuvent varier les effets observés.

*Carbonate de chaux.* — On a vu que le spath d'Islande est orangé dans le phosphoroscope, et cela avec une persistance qui ne se prolonge pas en général au delà de $\frac{1}{2}$ seconde; l'intensité de la lumière émise est très-variable, puisque certains échantillons ont une action assez forte, tandis que d'autres donnent un effet plus faible. Il est probable que ces différences tiennent à un état physique du corps, et non pas à la présence de matières étrangères; car en préparant artificiellement du carbonate de chaux on peut obtenir des effets analogues à ceux que donne le spath d'Islande.

Le carbonate de chaux peut donner lieu à une seconde action, c'est-à-dire présenter une émission de rayons bleus plus ou moins verdâtres, sans que l'on puisse prévoir les causes de ces divers effets. Il y a des cristaux de spath qui ne présentent que la teinte orangée, d'autres qui sont lumineux avec cette teinte, et qui deviennent ensuite bleuâtres quand l'appareil s'arrête; on peut alors voir le corps pendant quelque temps dans l'obscurité. La craie blanche offre un exemple d'un calcaire donnant les deux actions; l'arragonite, comme on le verra, ne donne qu'une émission de rayons bleus-verdâtres.

La lumière électrique provenant des décharges excitées entre les conducteurs d'un appareil d'induction peut servir à reconnaître l'émission des différents rayons orangés et bleus : il suffit de placer sur la petite tablette d'un excitateur, le fragment sur lequel on opère, et de faire éclater les décharges très-près de sa surface. En tenant les yeux

fermés pendant l'action des décharges, et en ne les ouvrant qu'à l'instant où cesse le passage de l'électricité, on peut observer les effets dus à la persistance des impressions reçues par le corps, et même l'émission des rayons orangés si l'on opère convenablement.

L'analyse de la lumière émise montre, au reste, que bien qu'un certain nombre de rayons lumineux soient émis par le carbonate de chaux, et que la teinte observée dans le phosphoroscope résulte d'un mélange de rayons, cependant la teinte dominante doit peu varier; en effet, en examinant au travers d'un prisme en sulfure de carbone, un cristal de spath d'Islande ou un fragment de carbonate de chaux bien lumineux orangé, on reconnaît que les limites de la lumière émise sont les mêmes qu'avec la chaux, et sont d'une part la raie C du rouge orangé (voir le n° 6 de la planche fig. 39), d'autre part une partie du spectre très-voisine de D dans le commencement du vert. La teinte de l'image $\alpha\beta$ est donc presque toute orangée, passant un peu au rouge en $\alpha$ et au vert en $\beta$; quand on examine le spath sans employer le prisme, la nuance est sensiblement celle de la partie CD du spectre solaire.

Si le corps placé dans le phosphoroscope est un cristal d'arragonite, on observe une longue trace lumineuse $\gamma\delta$ (n° 7 de la même planche), se terminant insensiblement en D et se prolongeant entre F et G, mais comprenant comme parties les plus vives le vert et le bleu; la nuance dominante de cette image, d'une intensité faible d'ailleurs, est donc le bleu verdâtre. Si, au lieu de spath d'Islande ou d'arragonite, on place dans le phosphoroscope un cristal de carbonate de chaux semblable à ceux dont il va être question plus loin et donnant les deux effets lumineux, on voit simultanément les deux images $\alpha\beta$, $\gamma\delta$, mais chacune avec des intensités variables, suivant les corps, l'un ou l'autre effet pouvant manquer.

Il était important de rechercher dans quelles circonstances ces deux effets peuvent se présenter simultanément ou séparément : j'ai observé que les cristaux rhomboédriques de spath d'Islande présentent en général la teinte orangée, mais que quelques-uns deviennent bleus et verdâtres; l'arragonite, comme on l'a vu, donne la même lumière bleue-verdâtre sans trace d'orangé. La forme cristalline des deux substances est différente, mais en élevant la température de l'arragonite, elle se divise, diminue de densité (au lieu 2,94, la densité devient 2,71), et bien qu'on admette qu'elle est transformée en petits cristaux

spathiques, la poussière conserve toujours la propriété de donner la teinte bleue caractéristique sans lumière orangée.

L'arragonite renferme souvent du carbonate de strontiane, et l'on aurait pu penser que ce dernier corps venant modifier l'effet du carbonate de chaux, l'état moléculaire différent ne serait pas la seule cause de ces deux actions lumineuses observées. Pour répondre à cette objection, j'ai d'abord examiné un très-grand nombre de cristaux naturels, soit rhomboédriques, soit des nombreuses variétés dérivant du rhomboèdre primitif, pensant que les causes qui ont donné lieu aux différences dans la cristallisation auraient pu modifier l'état moléculaire en vertu duquel l'émission de la lumière a lieu. Malgré la multiplicité des formes secondaires, on peut ramener celles-ci aux trois formes dominantes suivantes :

1° La forme rhomboédrique comprenant les rhomboèdres aplatis ou équiaxes, et les rhomboèdres inverses;

2° La forme prismatique;

3° La forme métastatique et ses modifications.

L'expérience a prouvé que, parmi les rhomboèdres, les équiaxes offrent les teintes orangées les plus vives, et que certains d'entre eux présentent ce phénomène lumineux d'une manière très-brillante. Les rhomboèdres ordinaires ont une action analogue, mais en général moins vive; on observe toujours la teinte orangée dans le phosphoroscope, et la persistance ne paraît pas supérieure à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ de seconde; quelquefois, cependant, en exposant ces derniers corps à l'action de la lumière solaire et en les rentrant dans l'obscurité, on a une émission un peu prolongée des rayons bleus verdâtres, mais de faible intensité.

Avec les rhomboèdres inverses, au contraire, la teinte lumineuse orangée est faible et même peut manquer, tandis que la lumière bleue est plus intense et en général domine le premier effet. Ainsi, le carbonate de chaux en rhomboèdres inverses transparents provenant du Chili n'a donné qu'une émission de lumière bleue comme l'arragonite, et à peine s'il y avait trace d'orangé. Avec le calcaire quartzifère cristallisé qui se trouve empâté dans le sable de Fontainebleau, le même effet se produit; mais des cristaux rhomboédriques inverses trouvés dans une géode de la même formation géologique ont offert une émission de rayons des deux réfrangibilités orangées et bleues, et même en tournant la roue du phosphoroscope avec une certaine vitesse, chaque cristal parais-

sait de diverses nuances dans plusieurs directions et présentait des effets de dichroïsme.

Les cristaux prismatiques de carbonate de chaux ont offert principalement la couleur orangée, avec plus ou moins de vivacité, et les cristaux de forme métastatique ont donné simultanément les deux effets avec une intensité à peu près égale.

D'après ces résultats, l'action dans le phosphoroscope ne dépend pas uniquement de la nature chimique du corps, puisque la chaux carbonatée ne se comporte pas comme l'alumine et ne donne pas toujours le même effet; on voit que si un certain nombre de cristaux de carbonate de chaux présentent la nuance orangée, d'autres, comme les rhomboèdres inverses, peuvent ne pas donner cette nuance. D'un autre côté, l'arragonite ne produit que de la lumière vert-bleuâtre, et doit être placée, au point de vue de la lumière émise dans le phosphoroscope, à côté de ces rhomboèdres. Mais si l'arrangement moléculaire est cause de la différence des effets produits, il n'est pas probable que cette différence tienne uniquement à la forme cristalline; car il peut se faire que les modifications physiques qui ont existé au moment où les cristaux se sont formés et qui ont produit les formes différentes, aient été cause d'un arrangement moléculaire spécial d'où sont résultés les effets que l'on observe.

Je dois faire remarquer qu'en parlant des teintes orangées ou vertes bleuâtres, je n'ai entendu indiquer que les teintes observées directement dans le phosphoroscope, la lumière émise résultant d'un mélange de rayons de diverses couleurs dont les intensités sont variables; cependant, il faut observer que les teintes bleues obtenues avec les différents spaths indiqués plus haut sont moins vertes que celles données par l'arragonite et en particulier par l'arragonite de Vertaison. Il suffit, pour le vérifier, de placer dans le phosphoroscope en les superposant, un cristal inverse ne donnant que du bleu et un fragment d'arragonite; on voit alors ces deux corps s'éclairer simultanément, mais en présentant des teintes un peu différentes.

Il était important de reconnaître si avec le carbonate de chaux obtenu par double précipitation et ne contenant pas de matières étrangères, on trouverait les mêmes effets que ceux donnés par les cristaux naturels; les résultats obtenus ont vérifié ces prévisions. Pour avoir du carbonate aussi pur que possible, on a pris des cristaux transparents de spath d'Islande ne donnant que de la lumière orangée dans le phosphoros-

cope, et après les avoir transformés en nitrate ou en chlorure, on a formé de nouveau du carbonate que l'on a précipité à l'aide du carbonate de soude ou du carbonate d'ammoniaque.

Si la préparation est faite en transformant le spath en nitrate ou en chlorure, l'effet ne paraît pas dépendre de la nature de l'acide, mais plutôt de celle du carbonate alcalin qui donne lieu au carbonate de chaux et de la température à laquelle la double décomposition se produit. Lorsque la précipitation est faite à 100 degrés, le carbonate de chaux obtenu ne donne que la teinte bleue persistante et n'offre à peine et même point de teinte orangée ; mais cependant avec le carbonate d'ammoniaque cette teinte bleue est plus vive que lorsque l'on emploie le sous-carbonate de soude pour opérer la double décomposition. Si la température à laquelle la réaction qui donne le précipité est de plus en plus basse, on distingue les deux effets lumineux décrits plus haut, et lorsque cette température est de 15 degrés environ, une lame de mica recouverte d'un peu de poussière de ce carbonate de chaux paraît jaune-orangée ou bleuâtre dans le phosphoroscope, suivant que l'on place sur la route des rayons lumineux actifs, comme on le verra plus loin, un écran jaune, ou bien un écran bleu-violet. J'ai dit plus haut que la nature de l'acide avait peu d'influence sur le pouvoir lumineux du carbonate précipité ; cependant, en précipitant le carbonate au moyen d'une dissolution de chlorure de calcium, la lumière jaune-orangée est plus vive qu'en opérant avec le nitrate.

On voit donc qu'avec du carbonate de chaux pur précipité on peut observer l'un ou l'autre des deux effets lumineux ; il est possible, toutefois, qu'à 100 degrés le précipité amorphe soit de l'arragonite ; mais comme à 15 ou à 0 degrés il n'en est pas ainsi, puisque le spath primitif ne donne que la teinte orangée, et que le carbonate formé de nouveau donne les deux teintes, il faut donc que l'état moléculaire seul du carbonate lui donne le pouvoir de présenter tel ou tel effet.

On a fait usage également des sels de chaux parfaitement purs, obtenus au moyen du spath transparent et de divers acides, et les dissolutions neutres ou rendues alcalines ont été placées sous une cloche, reposant sur un plateau en verre ; à côté, se trouvait une capsule renfermant des cristaux de carbonate d'ammoniaque, de sorte que la vapeur de ce corps précipitait peu à peu du carbonate de chaux des dissolutions. La plupart de ces dépôts cristallins, lavés et séchés, ont

présenté les deux effets lumineux au phosphoroscope, et les dissolutions de chlorure ont donné des teintes orangées plus intenses que les autres. Cependant, en faisant dissoudre du chlorure de sodium à saturation dans une dissolution de chlorure de calcium pur, le précipité de carbonate obtenu n'a offert que la teinte bleue. On sait en effet que les sels renfermés dans le dissolvant peuvent influer sur la forme du corps qui cristallise; ils peuvent donc influer aussi sur leur état physique, et cet exemple vient montrer que dans ce cas l'état moléculaire est analogue à celui des rhomboèdres inverses de carbonate de chaux ainsi qu'à celui de l'arragonite.

J'ai fait dissoudre différents carbonates de chaux (spath d'Islande transparent, craie, nacre de perle) dans de l'eau renfermant de l'acide carbonique, et les dissolutions de bicarbonates exposées à l'air ont laissé déposer des petits cristaux de chaux carbonatée qui, dans le cas du spath, avaient au microscope la forme spathique; les autres ont donné des formes difficiles à déterminer, mais se rapprochant des formes métastatiques.

Il est probable, d'après ces expériences, que les deux effets lumineux présentés par le carbonate de chaux, même très-pur, ne tiennent pas à des mélanges de matières étrangères, et ne dépendent pas uniquement de la forme cristalline, puisqu'une même forme peut présenter des effets différents; ils dépendent donc d'un état moléculaire que l'analyse optique seule a permis jusqu'ici de reconnaître.

Ces deux genres d'effets sont analogues à ceux que présente le diamant; mais si avec ce dernier corps ils peuvent être étudiés séparément par une vitesse différente du phosphoroscope, avec le carbonate de chaux la durée de la persistance des effets bleus et rouges étant plus grande, ce n'est qu'en arrêtant tout à coup la roue de l'appareil qu'on pourrait les distinguer. Cependant, l'analyse par réfraction et, comme on va le voir, l'action des rayons de diverses réfrangibilités suffisent pour permettre l'observation de cette double action lumineuse.

Si, au lieu d'éclairer les fragments de carbonate de chaux à l'aide de la lumière blanche, on agit avec les différents rayons du spectre solaire, on observe des effets analogues à ceux qui ont été décrits à l'occasion du diamant, mais avec plus d'intensité, en raison de la plus grande vivacité de la lumière émise. Les fragments de spath d'Islande seulement orangés sont lumineux depuis l'orangé du spectre,

c'est-à-dire depuis une limite comprise entre C et D avec le maximum d'action vers D, jusqu'en H à l'extrême violet, où l'effet est encore appréciable. Si la matière offre les deux effets lumineux orangé et bleu-verdâtre, lorsque les rayons actifs correspondent au milieu du spectre vers F, la nuance émise par le corps devient bleuâtre, et depuis cette partie du spectre jusqu'au violet la teinte bleue l'emporte; cependant l'analyse de la lumière par réfraction montre que dans la lumière émise par l'influence des rayons bleus il y a encore de l'orangé. Si le cristal étudié est de l'arragonite, on trouve que ce corps n'est impressionnable que par le bleu, le violet et les rayons ultra-violets du spectre. On observe donc ici un effet semblable à celui dont on a parlé page 315, et si l'on promène le corps placé dans le phosphoroscope depuis le violet prismatique jusqu'au rouge, la teinte du carbonate de chaux varie du bleu (quand il donne cet effet) jusqu'à l'orangé, les rayons émis n'ayant pas une réfrangibilité plus grande que celle des rayons actifs; seulement, comme avec le diamant, les nuances que l'on peut obtenir avec le carbonate de chaux ne sont que des nuances orangées ou du bleues plus ou moins vertes. On peut aussi, en se servant d'un écran de chromate jaune de potasse et d'un écran bleu formé par le sulfate de cuivre ammoniacal, rendre lumineux un cristal de spath métastatique ou de carbonate de chaux présentant les deux effets, et donner successivement à la même substance le pouvoir d'émettre une lumière orangée ou bleue-verdâtre avec la même vitesse du disque du phosphoroscope.

L'action exercée par le carbonate de chaux et les modifications qu'elle peut éprouver permettront d'étudier l'état moléculaire de ce corps dans le test des coquilles et dans différentes roches calcaires, et on peut espérer que l'on aura quelques indications sur les conditions physiques qui ont existé lors de la formation du carbonate de chaux dans ces divers corps. Du reste, l'emploi du phosphoroscope pourra être utilisé dans un grand nombre de circonstances comme servant à indiquer non-seulement la nature de certaines substances, mais encore leur état moléculaire.

*Fluorure de calcium.* — Le fluorure de calcium devient lumineux dans le phosphoroscope, en présentant des changements de nuances plus nombreux que le carbonate de chaux et que le diamant. Dans le tableau suivant on a résumé les effets produits avec divers échantillons de spath-fluor, d'abord en les éclairant avec la lumière des dé-

charges électriques, comme il a été dit page 55, puis ensuite en les exposant dans le phosphoroscope à l'action de la lumière solaire, et enfin en les plaçant dans les rayons ultra-violets sans faire usage de l'appareil.

Les expériences ont été faites avec différents échantillons de cristaux de spath-fluor, qui seront désignés par les numéros suivants :

Le n° 1 spath-fluor blanc très-limpide.

Le n° 2 spath-fluor jaune en cristaux cubiques.

Le n° 3 spath-fluor vert-bleuâtre.

Le n° 4 chlorophane verte très-lumineuse par élévation de température.

Le n° 5 spath-fluor bleu clair.

Le n° 6 spath-fluor violet.

Le n° 7 id.

Les fragments de ces corps ont été placés d'abord sur la tablette d'un excitateur universel, et l'on a examiné, après le passage d'une forte décharge électrique excitée près de leur surface, quelle était la couleur de la lumière émise ; cette lumière correspond donc à une persistance plus grande qu'une demi-seconde. On les a étudiés ensuite dans le phosphoroscope à l'aide de la lumière solaire concentrée avec une lentille. On a eu :

| LUMIÈRE ÉMISE APRÈS L'ÉTINCELLE. | LUMIÈRE DANS LE PHOSPHOROSCOPE. |
|---|---|
| N° 1. Faible, nuance indécise. | Faible, nuance indécise. |
| N° 2. Id. | Orangée faible quand le phosphoroscope tourne lentement, puis verte-jaunâtre avec une plus grande vitesse. |
| N° 3. Bleue-indigo, assez vive. | Bleue quand le phosphoroscope tourne lentement. Violette, puis orangée et enfin verte quand on augmente graduellement la vitesse de l'appareil. |
| N° 4. Verte, très-vive..... | Bleuâtre pour un mouvement lent, puis jaune-orangée et ensuite verte olive très-vive quand la vitesse est plus grande. |
| N° 5. Bleue..... | Bleu faible. |
| N° 6. Bleu-indigo, assez vive. | Jaune orangé, puis vert jaunâtre quand l'appareil tourne plus rapidement. |
| N° 7. » | Jaune orangé, puis vert quand l'appareil tourne plus rapidement. |

Quant aux effets observés dans les rayons ultra-violets, ils n'ont été sensibles qu'avec les échatillons n° 3, n° 5, n° 7, qui sous leur influence ont seuls présenté une lumière bleue.

Malgré la différence des effets produits on reconnaît une ten-

dance de la matière à présenter trois nuances différentes dans le phosphoroscope : 1°, une émission de rayons bleus de longue durée ; 2°, une lumière jaune-orangé d'une durée plus courte ; et enfin 3°, des rayons verts d'une persistance moindre. Les cristaux de spath fluor n° 3, et surtout la chlorophane n° 4 présentent très-nettement ces différents changements.

On sait que si l'on élève la température des fragments de fluorure de calcium colorés, ces fragments deviennent phosphorescents jusqu'à ce qu'ils aient perdu toute leur couleur ; dans cet état ils ne sont plus aptes à devenir phosphorescents par une nouvelle élévation de température. L'expérience a montré que les fragments ainsi décolorés donnent dans le phosphoroscope les mêmes effets qu'avant l'action de la chaleur. L'émission lumineuse qui accompagne l'action de la chaleur, laquelle est en rapport avec l'effet lumineux qui suit l'insolation, n'indique donc pas une destruction de l'état moléculaire en vertu duquel l'effet se produit dans le phosphoroscope, puisque cet effet persiste même après que la matière a cessé d'être phosphorescente par élévation de température.

Le fluorure de calcium présente des effets remarquables quant à la composition de la lumière émise et à la réfrangibilité des rayons actifs ; nous prendrons pour exemple l'échantillon de fluorure de calcium n° 4, (chlorophane ou fluorine verte) comme présentant les effets les plus marqués.

Si l'on analyse la lumière émise en éclairant le corps avec la lumière solaire blanche et en tournant très-lentement la roue du phosphoroscope, on voit que le spectre se compose d'une partie bleue $\delta$ (fig. 39, n° 9) qui se prolonge jusque dans le vert, et qui donne la lueur bleue-verte indiquée plus haut. En tournant plus vite l'appareil, et pour une durée de persistance qui n'est pas moindre que $\frac{1}{200}$ de seconde, on voit apparaître une bande orangée assez vive $\beta$ ainsi qu'une autre $\alpha$ moins lumineuse, et une bande verte assez étroite $\gamma$ ; quant à la teinte bleue $\delta$, elle subsiste toujours. Enfin, quand on fait tourner encore plus rapidement le phosphoroscope et pour une durée de persistance qui ne dépasse pas $\frac{1}{1000}$ de seconde, et qui peut être moindre, aux parties lumineuses précédentes vient s'ajouter une bande verte $\gamma'$, très-voisine de $\gamma$, et même avec une certaine vitesse, les deux bandes se réunissent en une seule, et l'on aperçoit également un peu de lumière entre $\beta$ et $\gamma'$.

On voit que les changements de nuance correspondent à des parties du spectre différentes : les rayons les plus réfrangibles persistent plus longtemps, puis les moins réfrangibles, et enfin ceux de la partie moyenne du spectre. Ces résultats montrent que le fluorure de calcium, comme le diamant et le spath d'Islande, donne des effets lumineux successifs sans que les rayons qui ont une moindre durée détruisent ceux qui persistent plus. Cependant, on doit remarquer qu'au moment où l'on fait tourner l'appareil de plus en plus rapidement, sans dépasser la vitesse de 300 tours par seconde, il semble que la lumière qui était répandue dans tout l'espace compris entre $\delta$ et $\gamma'$ diminue d'intensité. Mais je n'ai pu distinguer si l'effet ne résulte pas d'une illusion d'optique due à ce que, les espaces voisins de la partie du spectre dont il est question et surtout $\gamma'$ augmentant d'intensité, $\delta\gamma'$ devient en apparence plus sombre.

Si l'on suit les changements lumineux qui résultent de l'action des rayons différemment réfrangibles sur le fluorure de calcium, on trouve des effets plus complexes qu'avec l'alumine, le diamant et le carbonate de chaux, précisément par ce motif que la persistance de ces différents effets varie dans des limites plus étendues. Il faut opérer avec la fluorine verte pour obtenir les résultats dont il va être question : les limites des parties actives du spectre sont d'une part l'orangé ou près de la ligne C, et d'autre part les rayons ultra-violets. Il y a un premier maximum d'action près de E dans le vert et un autre vers G dans le bleu indigo ; entre ces deux maxima se trouve une partie du spectre où l'action est beaucoup moins vive, et qui correspond au commencement du bleu en F. Si l'on cherche à reconnaître les nuances émises, on remarque que dans le premier maximum, le fluorure placé dans le phosphoroscope a une teinte plus verte, et que cette teinte devient orangé très-faible dans l'orangé à la limite de la partie active du spectre solaire ; mais la lumière émise par ce mode d'expérimentation est trop faible pour permettre une analyse complète à l'aide d'un prisme. On ne peut y parvenir qu'en éclairant successivement le corps dans le phosphoroscope à l'aide de rayons qui ont traversé différents écrans colorés, comme l'indique la figure 38, page 335, et en analysant la lumière émise à l'aide du prisme en sulfure de carbone.

On a placé successivement sur la route de la lumière incidente avant son action sur le fluorure de calcium (fluorine verte), disposé dans le phosphoroscope, les écrans colorés ci-après désignés ;

1° Aucun écran;

2° Un écran bleu, formé par une dissolution ammoniacale de sulfate de cuivre;

3° Un écran vert, fait avec une dissolution de bichlorure de cuivre;

4° Un écran jaune, formé par une dissolution de chromate de potasse;

5° Un écran orangé, fait avec une dissolution de bi-chromate de potasse;

6° Un verre rouge, coloré par le protoxyde de cuivre.

On a ensuite successivement examiné la teinte du fluorum de calcium quand on a mis le phosphoroscope en rotation, ainsi que la composition de la lumière émise au moyen de la réfraction dans un prisme. On a eu :

| ÉCRANS. | TEINTE DU FLUORURE. | COMPOSITION DE LA LUMIÈRE ÉMISE. |
|---|---|---|
| Sans écran (n° 1). | Verte bleuâtre, puis orangée et verte très-vive, suivant la vitesse du phosphoroscope. | On voit successivement les parties du spectre $\alpha$, $\beta$, $\gamma\gamma'$ et $\delta$ représentées planche fig. 34, n° 9. |
| Écran bleu (n° 2). | Id., mais moins vive. | Id., mais les teintes moins vives surtout $\gamma\gamma'$; $\beta$ est plus pâle et $\alpha$ à peine visible. |
| Écran vert (n° 3). | Verte, très-vive. | $\delta$ est faible et peu étendu; $\gamma\gamma'$ très-intense et $\beta$ faible. |
| Écran jaune (n° 4). | Id. | Id. $\gamma\gamma'$ intense, mais $\beta$ assez net et $\alpha$ faible. |
| Écran orangé (n° 5). | Orangée. | $\delta$ faible, $\gamma\gamma'$ à peine visible, $\beta$ et $\alpha$ bien nets. |
| Écran rouge (n° 6). | Lueur faible sans teinte bien appréciable. | L'effet lumineux est trop faible, pour distinguer la réfrangibilité des rayons et leur couleur. |

On voit, d'après ce tableau, que la partie moyenne du spectre ou la partie verte exerce une action toute spéciale et différente de celle des deux extrémités du spectre solaire; elle donne lieu à une émission de rayons verts très-intenses et d'une courte durée, qui produisent l'image moyenne verte $\gamma\gamma'$, n° 9. Les rayons les plus réfrangibles, ou la partie FG du spectre, peuvent exciter des rayons des diverses réfrangibilités avec des intensités et des durées inégales, et les rayons orangés ne donnent avec quelque intensité que du jaune et de l'orangé.

Il y a une remarque que je dois faire ici : on a vu qu'avec les écrans orangés, jaunes et verts, qui ne laissent passer que les parties du

spectre comprises entre A et F, on avait dans l'analyse de la lumière émise quelque indice de la portion δ, moins longue, il est vrai, que dans le n° 9, mais correspondant au vert et au bleu et par conséquent étant plus réfrangible que les rayons actifs ; d'un autre côté, avec l'écran de verre rouge on a une lueur extrêmement faible sans teinte nette, mais qui m'a paru blanche-verdâtre. Ces lueurs, très-faibles il est vrai, mais cependant appréciables, tendaient à montrer que des rayons lumineux pouvaient donner lieu dans certains cas à de la lumière dont la longueur d'onde est plus courte que celle des rayons actifs, ce qui est contraire aux observations faites jusqu'ici avec les autres corps. J'ai pensé qu'il y avait peut-être là une action secondaire venant compliquer l'effet du rayonnement lumineux : comme la fluorine est assez vivement phosphorescente par l'action de la chaleur, et que le corps placé dans le phosphoroscope et au foyer de la lentille est échauffé pendant l'expérience, quand on opère avec les écrans rouges, jaunes ou verts, on doit observer simultanément l'action de la lumière et l'action de la chaleur. C'est en effet ce qui a lieu : pour le prouver, on fait chauffer préalablement un fragment de fluorure de calcium ; il émet la lumière due à la phosphorescence par élévation de température, puis quand il est revenu à la température ordinaire, et qu'il a perdu sa couleur propre, on le place de nouveau dans l'appareil. L'action de la lumière donne le même effet que précédemment avec les écrans bleus ou sans écran, mais toute trace correspondante à δ n'apparaît plus avec les écrans rouges, jaunes et verts ; on retrouve alors les effets observés avec les autres matières.

On peut conclure de là qu'il n'en est pas de même de la chaleur et de la lumière ; l'action calorifique excite des rayons lumineux de toute longueur d'onde, tandis que jusqu'ici l'action lumineuse ne donne lieu qu'à des rayons d'une longueur d'onde plus grande ou au moins égale à celle des rayons actifs.

Le fluorure de calcium permet encore de conclure que les rayons de diverses réfrangibilités peuvent exciter les rayons différant également entre eux de réfrangibilité et ayant des durées de persistance inégales ; indépendamment de cela, il n'y a aucune relation entre la durée et la réfrangibilité de la lumière émise.

On peut demander si lors de l'action de la lumière blanche les effets des différents rayons qui la composent doivent tous s'ajouter, et si quelques phénomènes analogues à ceux des interférences ne pour-

raient pas avoir lieu. Je puis seulement répondre que je n'en ai pas encore observé, et que la lumière blanche m'a paru jusqu'ici donner la somme des effets observés séparément avec les différents rayons colorés.

*Phosphate de chaux.* — Le phosphate de chaux, principalement le phosphate naturel, est une substance dont l'action est assez vive. Le biphosphate de chaux artificiel en paillettes a une faible action : fondu, il est transparent, et donne une lumière jaune-orangée de moyenne intensité ne changeant pas de nuance quand on fait varier la vitesse du phosphoroscope. En analysant la lumière émise par ce dernier corps avec le prisme en sulfure de carbone, on ne voit qu'une seule partie lumineuse sans apparence de maxima ni de minima d'intensité; elle occupe l'orangé, le jaune et une partie du vert, c'est-à-dire l'espace C*b*.

Un cristal de phosphate de chaux naturel blanc (apatite) rendu actif par la lumière blanche a donné une action lumineuse assez vive jaune-verdâtre, et une seule trace lumineuse vue au travers du prisme comme le phosphate artificiel fondu. Le phosphate vert a présenté au contraire une action particulière et une composition lumineuse remarquable : des fragments de cristaux trouvés près de Jumillac, et ayant une couleur naturelle légèrement verte, ont émis une lumière verte quand le phosphoroscope a tourné lentement, et la teinte est devenue de plus en plus orangée à mesure que l'appareil a tourné plus rapidement; le maximum a semblé atteint quand le disque du phosphoroscope a fait cent révolutions par seconde, c'est-à-dire pour une durée de persistance lumineuse de $\frac{1}{800}$ de seconde.

Vue avec le prisme, l'image se compose de trois bandes lumineuses $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, équidistantes, *fig.* 39, n° 8, $\alpha$ étant orangé-rouge, $\beta$ orangé et $\gamma$ vert. Lorsque l'on fait varier la vitesse du phosphoroscope, la bande verte $\gamma$ apparaît la première, puis les deux autres avec une vitesse plus grande. Les parties intermédiaires entre $\alpha$, $\beta$ et $\gamma$ sont obscures, mais au delà de $\gamma$ il y a une faible traînée de lumière verdâtre. La position de la bande orangée $\beta$ est à noter, car elle correspond à celle de la bande lumineuse $\beta$, n° 9, du fluorure de calcium et à la position du maximum de lumière dans le spectre donné par la lumière de la chaux et par celle du spath d'Islande, n° 6. On retrouve encore une émission de lumière de cette réfrangibilité avec les composés où l'effet lumineux de la chaux est prédominant.

En étudiant le spectre obtenu quand on se sert de la disposition re-

présentée figure 38, la lumière émise n'est pas assez vive et l'image est trop large pour que l'on puisse distinguer des raies noires. Cependant, il existe des raies dans les images prismatiques, et je ne doute pas que dans la lumière émise par d'autres corps il n'en soit de même. Il suffit, pour s'en convaincre, d'opérer comme on l'a indiqué pour le rubis et le spinelle, en fixant le fragment de phosphate de chaux vert sur la fente du collimateur H ; si l'on place alors en E l'écran bleu foncé, et que l'on enlève le phosphoroscope pour laisser arriver directement la lumière bleue concentrée sur le corps, on distingue avec la lunette G l'espace lumineux $\beta$ au milieu et à côté duquel se trouvent quelques raies noires très-fines. Mais les parties $\alpha$ et $\gamma$ ne sont pas distinctes en opérant de cette manière, c'est-à-dire n'apparaissent pas nettement par l'action des rayons bleus.

Un fragment d'un gros cristal de phosphate légèrement vert (phosphorite) impressionné par la lumière blanche a donné les trois bandes $\alpha$, $\beta$ et $\gamma$, mais avec de la lumière répandue dans toute la partie $\alpha\gamma$, de façon à rendre les limites de ces espaces moins nettes qu'avec la phosphorite chrysolite de Jumillac. Je dois faire remarquer que j'ai employé des fragments de cette dernière substance, de même que des fragments de nitrate d'urane, afin d'avoir simultanément avec les spectres donnés par des corps placés dans le phosphoroscope, des lignes lumineuses parfaitement fixes dont les positions servent de points de repère aux bandes lumineuses ou obscures qui traversent les images prismatiques.

Le phosphate de chaux naturel violet a été plus vivement lumineux que le phosphate vert, en présentant une teinte jaune légèrement verdâtre qui n'a pas varié avec la vitesse du phosphoroscope ; vu avec un prisme, il n'a donné qu'une image prismatique comprise entre les positions C et F des raies noires du spectre solaire, et dont le maximum d'action a semblé correspondre à la bande $\gamma$ du phosphate de chaux vert, n° 8.

Si l'on examine quelle est l'étendue active du spectre solaire sur le phosphate de chaux et quelle est la réfrangibilité des rayons émis, on observe plusieurs maxima d'action, de même qu'en étudiant l'action du spectre solaire sur certains sulfures de strontium et de calcium, comme on l'a fait dans le premier Mémoire. Le phosphate de chaux vert donne cet effet avec beaucoup de netteté ; le phosphate violet le produit également, mais d'une manière moins tranchée. Pour l'observer, il faut faire passer par tous les points d'un petit spectre très-lumineux, un

fragment de phosphate placé au milieu du phosphoroscope : on reconnaît alors que dans les rayons violets il y a une action qui augmente en avançant vers le rouge; dans l'indigo, près de G, cette action a un maximum d'intensité; en passant dans une partie moins réfrangible, l'action diminue bientôt, et en s'approchant de F, à la limite du bleu et du vert, elle augmente de nouveau et l'on observe un second maximum plus fort que le premier; puis l'action va en diminuant jusqu'à l'orangé. Il est probable que d'autres substances donnent lieu à des différences de même ordre, mais d'une manière moins tranchée.

En se servant d'écrans colorés, le phosphate de chaux ne présente que de très-faibles changements de nuance. Les parties osseuses des animaux, comme les os, les dents, sont assez vivement lumineuses; mais comme, indépendamment du phosphate de chaux, elles renferment du fluorure de calcium, l'effet produit est dû à la réunion de plusieurs matières impressionnables.

*Silicates de chaux.* — Le silicate de chaux donne une lumière jaune et verte, comme les autres composés de chaux dont nous avons déjà parlé. La wollastonite (bi-silicate de chaux) offre deux nuances bien différentes, suivant la vitesse du phosphoroscope; quand on l'éclaire avec de la lumière blanche, cette matière est rouge-orangée lorsque le disque de l'appareil tourne très-lentement, et devient presque immédiatement verte lorsque l'appareil tourne plus rapidement. L'image prismatique donnée par la lumière émanée du corps n'offre pas d'alternative de lumière et d'obscurité, et va depuis la raie C du rouge jusqu'à moitié de la distance de D à F.

Avec cette matière, comme avec les substances qui donnent des rayons de diverses réfrangibilités, et qui ont par conséquent un spectre lumineux d'une certaine étendue, on retrouve les mêmes effets qu'avec le fluorure de calcium, le carbonate de chaux, le diamant, etc., c'est-à-dire que la réfrangibilité de la lumière incidente a une grande influence sur celle des rayons émis par les corps. Si l'on place sur la route du faisceau de rayons solaires qui pénètre dans l'appareil un écran jaune de chromate de potasse, le bisilicate de chaux est jaune et reste jaune-orangé, quelle que soit la vitesse de l'appareil; car on a vu qu'un corps ne donne pas de rayons d'une réfrangibilité plus grande que celle des rayons actifs. Avec un écran de sulfate de cuivre ammoniacal, la lumière émise par le corps est de couleur verte.

Il y a un très-grand nombre de minéraux dans la composition des-

quels entrent la silice, la chaux, l'alumine et d'autres matières; souvent ces substances sont lumineuses, d'autres fois elles ne présentent aucune action. L'axinite ainsi que la tourmaline, qui sont des silico-borates d'alumine et de chaux, ne donnent aucun effet; cependant le silicate de chaux, le borate de chaux et l'alumine sont, séparément, des substances actives.

Le pyroxène et l'amphibole, qui sont des doubles silicates de chaux et de magnésie renfermant plus ou moins de fer, sont lumineux dans le phosphoroscope, le pyroxène l'étant un peu plus que l'amphibole, en raison peut-être de la plus grande proportion de chaux qu'il contient. Dans l'un comme dans l'autre minéral, les variétés incolores ou peu colorées sont seules actives; quand la proportion de fer dépasse une certaine limite, on n'observe plus aucun effet. La variété de pyroxène appelée diopside, blanche ou légèrement verdâtre, donne une lumière jaune-orangée, dans laquelle on reconnaît le caractère de coloration des composés de chaux; le spectre obtenu avec la lumière émise par ce corps est représenté pl. fig. 39, n° 11 : on distingue une bande lumineuse $\alpha$, voisine de la ligne C, puis un espace obscur $\alpha\beta$, et ensuite une bande faiblement lumineuse allant jusque près de F. L'amphibole trémolite donne aussi une lumière jaunâtre, mais moins vive que le pyroxène; il en est de même de l'amiante.

Le sphène, qui est un silico-titanate de chaux, est impressionnable et donne une lumière jaune-orangée de moyenne intensité; cette lumière, comme celle émise par les deux minéraux précédents, ne change pas sensiblement de nuance quand on fait varier la vitesse du phosphoroscope.

La leucophane, dont il a été déjà question antérieurement (double silicate de chaux et de magnésie, renfermant du fluorure de sodium), est une substance dont la composition est fort complexe, mais qui donne une action vive dans le phosphoroscope. Éclairée avec la lumière solaire blanche, elle offre une émission de lumière orangée dont le spectre est représenté fig. 39, n° 10. Ce spectre est formé de cinq parties lumineuses séparées par des intervalles obscurs : une portion rouge $\alpha$ est très-pâle; la bande $\beta$ orangée est assez vive ; ensuite vient une bande verte $\gamma$ moins brillante et séparée d'une autre partie verte beaucoup plus faible par un espace obscur; enfin en $\delta$ se trouve un espace bleu de faible intensité et dont les limites sont mal définies. En somme, sous le rapport de la lumière émise, la substance dont il s'agit se rapproche plus du fluorure de calcium que tout autre corps.

L'étendue de la partie active du spectre solaire sur cette substance est assez grande, et l'on y remarque deux maxima d'action, l'un vers F, l'autre près de G, comme avec le phosphate de chaux; seulement, les effets ne sont pas aussi tranchés que lors de l'emploi de cette dernière substance.

Quant à ce qui concerne l'action de rayons différemment réfrangibles sur ces divers silicates, on ne pourrait répéter que ce qui a été dit plus haut à propos des autres corps : la réfrangibilité des rayons émis dépend de la réfrangibilité des rayons actifs, et n'est pas plus grande, de sorte qu'en prenant pour rayons incidents les rayons orangés, jaunes, verts ou bleus, la substance active présente des changements de nuance faciles à prévoir et analogues à ceux du fluorure de calcium, du phosphate et du bisilicate de chaux.

*Sulfures de calcium.* — Les sulfures de calcium, qui sont compris parmi les phosphores artificiels décrits dans le chapitre Ier, sont lumineux dans le phosphoroscope, et donnent en général une lumière analogue à celle qu'ils répandent pendant un temps assez long après leur exposition préalable à la lumière solaire ou diffuse. Quand on veut les placer dans le phosphoroscope, comme ils sont opaques, il suffit d'en réduire en poussière une petite quantité, et de fixer cette poussière sur une lame de mica avec de la gomme arabique, pour observer les effets lumineux pendant le mouvement de l'appareil.

Les sulfures qui ont été examinés particulièrement sont :

Le sulfure de calcium lumineux rouge orangé.

Le sulfure de calcium lumineux vert.

Le sulfure de calcium lumineux bleu.

Les deux premiers n'ont donné que des nuances orangées et vertes, avec une composition lumineuse analogue à celle présentée par le spath et par l'arragonite, sans indication de raies noires ou de bandes lumineuses. Le troisième a donné une teinte bleue très-belle, mais plus ou moins claire suivant sa préparation. Si le sulfure bleu a été préparé par la calcination de coquilles d'huîtres avec le persulfure de potassium, les fragments de ces coquilles sont bleus quand le phosphoroscope tourne lentement, et deviennent tantôt blancs, tantôt jaunâtres quand il tourne vite, preuve de la présence d'une matière (la chaux) dont l'effet s'ajoute à celui du sulfure bleu, pour changer la composition de la lumière émise.

En choisissant un fragment très-lumineux et qui donnait cette teinte

blanche, la lumière émise, analysée avec le prisme, a présenté une étendue prismatique presque égale à BH avec un minimum d'action dans le vert près de E.

Ce même fragment après avoir été préalablement échauffé puis refroidi dans l'obscurité a été placé dans le phosphoroscope ; en l'éclairant avec des rayons rouges, orangés, etc., il a présenté les effets suivants :

| Écrans. | Teinte de la matière. |
|---|---|
| Verre rouge..... | aucun effet appréciable. |
| Écran orangé (bichromate de potasse)..... | orangée. |
| — jaune (chromate jaune de potasse)..... | jaune. |
| — vert (bichlorure de cuivre)..... | jaune. |
| — bleu (sulfate de cuivre ammoniacal)..... | bleu clair. |
| Lumière blanche..... | blanche. |

L'analyse par réfraction de la lumière émise montre donc qu'à mesure que la réfrangibilité de la lumière active augmente, le spectre gagne en étendue, et qu'il n'y a pas de rayons émis plus réfrangibles que les rayons actifs. Si, au contraire, on commence par opérer avec la lumière blanche incidente, puis avec des rayons de moins en moins réfrangibles, on a pendant un certain temps avec les écrans jaunes et verts une trace de lumière bleuâtre correspondant à FG; cet effet est dû à ce que la matière, déjà impressionnée, étant fortement phosphorescente, luit également par élévation de température et par l'action de la lumière. On a donc des effets complexes comme avec le fluorure de calcium ; pour les éviter, il faut, comme on l'a dit, élever préalablement la température du corps, et l'impressionner en commençant par les rayons les moins réfrangibles; on observe alors les mêmes effets qu'avec le fluorure de calcium et qu'avec la potasse, comme on le verra plus loin.

Il y a d'autres composés à base de chaux qui doivent leur impressionnabilité à la présence de cette substance ; je ne les ai pas essayés tous, mais j'ai pu constater que le borate de chaux donne une émission de lumière verdâtre faible, peut-être plus jaune que l'acide borique fondu. Quelques échantillons de tungstate de chaux naturel ont donné de la lumière, d'autres sont restés inactifs. Différentes matières vitrifiées actives renferment également de la chaux, et je ne doute pas que cette

base ne donne quelque activité aux différents verres impressionnables. Dans le paragraphe suivant, au reste, je citerai la composition de verres dont j'ai pu étudier les effets lumineux.

### § 5. — *Composés à bases des métaux alcalins ou terreux.*

*Composés à bases de potassium et de sodium.* — A côté des substances contenant de la chaux, je devrais naturellement placer celles qui renferment de la strontiane et de la baryte ; mais comme il a d'abord été question des corps dont les actions dans le phosphoroscope sont les plus vives et les plus remarquables, je commencerai par indiquer les résultats donnés par la potasse et par la soude.

La potasse anhydre obtenue par la fusion de l'hydrate avec le potassium ne m'a pas donné d'action appréciable, mais l'hydrate de potasse ordinaire très-blanc et fondu est vivement lumineux, et offre même un changement de teinte dans le phosphoroscope, suivant la vitesse de cet appareil. En tournant très-lentement les disques, on a une émission de lumière bleue qui est assez persistante pour que la matière paraisse phosphorescente par les moyens ordinaires ; en augmentant la vitesse, la nuance passe au vert olive, et quand on arrive à une durée de persistance de $\frac{1}{1000}$ de seconde, il y a production d'une lumière verte très-vive et de la couleur de celle qu'émet le nitrate d'urane.

Quand on réfracte la lumière émise dans ce dernier cas, on trouve qu'elle renferme des rayons lumineux très-diversement réfrangibles, et l'image prismatique observée alors est une des plus étendues que l'on puisse avoir ; son spectre s'étend depuis la partie qui correspond à la raie B du spectre solaire jusqu'au delà de G, près de H, sans indication de bandes alternatives lumineuses et obscures. Cette émission de rayons différemment réfrangibles ayant des durées inégales rend assez étendus les changements de couleur que l'on peut obtenir en faisant varier la réfrangibilité des rayons actifs.

Si l'on cherche d'abord quelles sont les parties du spectre qui impressionnent l'hydrate de potasse, on trouve que cette substance devient lumineuse depuis le rouge orangé jusque bien au delà du violet ; si l'on fait passer alors successivement un fragment d'hydrate de potasse placé dans le phosphoroscope dans toutes les parties du spectre solaire depuis le violet jusque dans le rouge, on voit qu'il émet la lumière verte citée plus haut, depuis l'extrême violet jusque près du vert. Avec cette der-

nière couleur, la nuance passe au jaunâtre, puis au jaune, et devient orangée-rouge dans le rouge prismatique.

Cette succession de teintes peut être aussi observée en faisant usage des écrans colorés disposés comme l'indique la fig. 38, page 335 ; on a eu en effet :

| Écrans placés sur la route des rayons incidents. | Couleur de la lumière émise par l'hydrate de potasse. |
|---|---|
| Verre rouge. | Aucune action appréciable. |
| Écran de bichromate de potasse. | Rouge-orangée. |
| — de chromate jaune. | Orangée-jaune. |
| — de bichlorure de cuivre. | Jaune-verte. |
| — de sulfate de cuivre ammoniacal. | Verte (moins vive qu'avec la lumière blanche). |
| Sans écran. | Verte, lumière vive. |

Quand on analyse avec un prisme la lumière émise par ce corps dans ces différentes circonstances, on trouve que l'étendue du spectre est de plus en plus grande, à mesure que les écrans placés sur la route de la lumière incidente laissent passer des rayons de plus en plus réfrangibles, c'est-à-dire que l'on démontre encore avec cette substance que la longueur d'onde des rayons émis est plus grande que celle des rayons actifs. On voit, d'après ce résultat, que l'hydrate de potasse fondu est une des substances qui se prêtent le mieux aux changements de nuances que l'on fait naître suivant la réfrangibilité des rayons actifs.

L'hydrate de soude produit des effets analogues à ceux que donne l'hydrate de potasse, si ce n'est que cette substance donne une teinte plus bleue que cette dernière en tournant lentement l'appareil, et présente une teinte verte moins vive en tournant rapidement le phosphoroscope ; du reste, les autres effets ont été analogues à ceux donnés par la potasse.

On a déjà dit précédemment, page 211, que les sels de potasse et de soude donnaient, par phosphorescence une émission de lumière en général verdâtre, mais de faible intensité ; on observe cet effet avec les nitrates, sulfates, chlorures, iodures, bromures, et avec la plupart des sels à bases de potassium et de sodium. Les borates fondus sont aussi dans ce cas : le borate de soude fondu (borax) donne une nuance jaune peut-être moins vive que le même composé à base de potasse.

Le silicate de potasse formé de 1 équivalent de potasse et de 1 équivalent de silice, fondu à la température rouge, donne une belle lumière verte en tournant rapidement la roue du phosphoroscope; il semble que cette teinte soit analogue à celle que donne l'hydrate de potasse avec la même vitesse de l'appareil, et que la lumière plus bleuâtre et persistante que présente celle-ci avec une vitesse moindre ne soit pas appréciable. Le silicate de soude se comporte d'une manière analogue au silicate de potasse. Nous verrons plus loin que ces silicates donnent en grande partie aux différents verres (crown ou flint) les propriétés lumineuses dont jouissent ces derniers.

*Composés à base de barium et de strontium.* — Les combinaisons à base de barium et de strontium se comportent, en général, comme celles à base de calcium; les sels tels que les chlorures, nitrates, acétates, sont également lumineux et donnent des teintes jaunâtres et verdâtres. Mais, tandis que la chaux fortement calcinée est lumineuse, je n'ai pas observé que la baryte et la strontiane le fussent dans les mêmes conditions. Le sulfate de strontiane naturel est lumineux d'une manière assez marquée, tandis que celui de baryte ne donne pas d'action bien nette. On doit remarquer que les composés du strontium sont plus généralement impressionnables que ceux du barium et donnent des effets plus intenses.

En élevant à la température rouge blanc un mélange de 2 parties de strontiane caustique avec 1 partie de silice, on forme un silicate fusible qui est translucide et qui émet dans l'appareil une lumière jaunâtre faible.

Le carbonate de strontiane naturel donne une action assez vive, et l'on observe même un changement de couleur suivant la vitesse de rotation du phosphoroscope. Le carbonate légèrement verdâtre du cap Strontian offre surtout cet effet : il donne d'abord une lumière verte qui passe à l'orangé quand le disque de l'appareil tourne plus rapidement. La lumière émise quand les rayons solaires impressionnent la substance, étant réfractée au travers d'un prisme en sulfure de carbone, donne un spectre représenté n° 12 planche fig. 39 : il se compose de trois bandes brillantes $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, qui correspondent à peu près aux trois bandes de la chaux phosphatée, n° 8; seulement, leurs limites ne sont pas aussi nettes, et la partie orangée $\beta$ est la plus intense. On observe également une longue trace verte et bleue, peu intense et sans alternatives d'ombre et de lumière; cette portion de l'image prismatique est celle qui correspond

aux rayons dont la persistance est la plus grande, et qui donne la teinte bleue-verdâtre au carbonate quand le mouvement du phosphoroscope est très-lent. Cette substance, dont la longueur de l'image prismatique est assez grande, presente des changements de nuance quand on fait varier la réfrangibilité des rayons actifs, comme les corps dont on a parlé précédemment.

Je n'ai pas obtenu à l'état de fusion le silicate de baryte isolé, mais je ne doute pas qu'il ne présente un effet analogue à celui de strontiane et de chaux. L'harmotome, qui est un silicate d'alumine et de baryte hydraté, donne une lumière verte-jaunâtre faible. Le carbonate de baryte n'a qu'une action peu énergique, et la baryto-calcite (double carbonate de baryte et de chaux) devient lumineuse orangé à peu près de la même manière que le carbonate de chaux spathique.

Les sulfures phosphorescents de strontium et de barium donnent, de même que les sulfures de calcium, des effet lumineux très-vifs dans le phosphoroscope. On peut citer notamment :

Le sulfure de strontium phosphorescent rouge orangé n° 1 (1).

Le sulfure de strontium phosphorescent vert n° 3.

Le sulfure de strontium phosphorescent bleu violet n° 6.

Les images prismatiques n'ont manifesté aucune bande obscure. Celle produite par le sulfure de strontium n° 1 a été comprise entre la partie qui correspond à la raie noire C du spectre solaire et un tiers de la distance de D à F; le spectre de la lumière émise par le sulfure vert n° 3 s'est trouvé compris entre B et F, la partie verte étant très-vive; mais celui de la lumière due au sulfure bleu violet est remarquable en ce qu'il comprend l'extrémité du vert, le bleu et le violet, c'est-à-dire presque toute l'étendue F H du spectre lumineux solaire. Cette dernière matiere phosphorescente, ainsi que le sulfure de calcium n° 5 cité plus haut, offrent les nuances bleues les plus vives que j'aie observées jusqu'ici avec les corps impressionnables.

Le sulfure de barium lumineux rouge orangé n° 1, voir page 139, et le sulfure de barium lumineux jaune n° 2 donnent des effets assez intenses. Le premier conduit à un spectre qui s'étend depuis la réfrangibilité qui correspond à *a* jusque près de E avec le maximum d'action entre B et D.

Parmi les composés de baryte qui sont lumineux d'une manière assez

(1) *Annales de Chimie et de Physique,* tome 55, page 50.

vive, on doit citer encore l'oxamate de baryte, donnant un spectre qui s'étend entre D et B et jusqu'en F, et qui émet une lumière blanche verdâtre sous l'action de la lumière ultra-violette du spectre.

*Composés à base de zinc et de cadmium.* — La blende hexagonale, dont il a été question au commencement de ce livre, page 240, peut offrir une persistance de longue durée (1); mais les cristaux blancs de ce composé, qui entourent les parties centrales lumineuses des préparations, et qui n'offrent pas une phosphorescence de longue durée, étudiés au phosphoroscope donnent une lumière propre d'un beau bleu pour une vitesse modérée de l'appareil, ce qui indique une persistance de phosphorescence de $\frac{1}{100}$ de seconde au plus. Les cristaux blancs ou jaunes qui sont au centre, et qui sont lumineux vert par un effet de phosphorescence de longue durée, donnent une lumière jaune-verdâtre pour la plus faible vitesse de l'appareil, puis changent de nuance à mesure que cette vitesse augmente et passent au bleu de façon à présenter une teinte moins foncée que les précédents, par suite du mélange de la lumière verte à la lumière bleue de courte persistance.

Ces derniers cristaux offrent donc par phosphorescence des rayons différemment réfrangibles de durée inégale : des rayons verts de longue durée et des rayons bleus de courte durée; mais si tous les échantillons que j'ai essayés présentent la couleur bleue, il n'y en a que quelques-uns qui soient lumineux vert et cela par un mouvement lent du phosphoroscope.

La blende hexagonale se rapproche donc des corps tels que le diamant et le silicate de chaux, dont on a parlé plus haut, et qui changent de nuance dans le phosphoroscope; mais les effets qu'elle présente sont à noter, car les substances qui donnent une belle couleur bleue dans l'appareil sont peu nombreuses. L'analyse par réfraction de la lumière émise n'indique qu'une lueur continue, et ne donne pas des lignes ou des bandes comme avec les substances dont il a été question précédemment.

Quelques composés à base de zinc sont lumineux dans le phosphoroscope, mais à un moindre degré; la calamine donne des nuances jaunes plus ou moins blanchâtres suivant les échantillons.

Le sulfure de cadmium cristallisé, obtenu par M. Sidot par volatilisation de la même manière que la blende hexagonale, vu dans le phos-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 63, p. 143, 1866.

phoroscope, n'offre pas une phosphorescence persistante comme cette substance, mais il devient lumineux avec une teinte orangée quand on fait tourner très-rapidement la roue de l'appareil; il donne donc une phosphorescence de cette nuance, mais de très-courte durée.

*Composés à base de magnésium, de zirconium, de glucium.* — La magnésie et un certain nombre de ses combinaisons deviennent lumineuses dans l'appareil. Si l'on fait calciner pendant longtemps de la magnésie, on a une matière pulvérulente qui est phosphorescente rouge avec une teinte analogue à celle que donne l'alumine, mais dont la lueur émise est beaucoup moins vive. Le carbonate de magnésie est egalement lumineux. La dolomie (double carbonate de chaux et de magnésie) émet une lumière analogue à celle que présente le spath d'Islande, mais plus rouge, effet de couleur que donne la dolomie quand elle est frottée avec un corps dur. Quant au silicate de magnésie (péridot) et au borate (boracite), ils n'ont donné aucune action appréciable. La condrolite, qui est un silicate de magnésie renfermant du fluor, donne une émission de lumière rouge-orangée assez faible.

Parmi plusieurs échantillons de zircone qui m'ont été remis, j'en ai trouvé un faiblement lumineux, d'autres sont restés obscurs; le premier était-il mélangé d'autres corps, ou bien cette matière, suivant son état physique, donne-t-elle des effets différents? C'est ce que je n'ai pu vérifier. Le zircon (silicate de zircone) a donné une émission de lumière jaune très-faible.

La glucine n'a pas présenté d'émission lumineuse appréciable, mais le carbonate de cette base offre une lumière verte assez vive. La phénakite (silicate de glucine naturel) est très-faiblement lumineuse sans teinte appréciable.

L'yttria, la thorine, etc., n'ont donné aucun effet digne d'être signalé.

Les différents verres, qui sont des silicates alcalins mélangés avec de l'alumine et des composés métalliques, deviennent lumineux avec plus ou moins d'intensité, et offrent des nuances vertes, quelquefois jaunâtres ou bleuâtres; les effets qu'ils présentent sont analogues à ceux des silicates alcalins dont on a parlé plus haut; voici la composition des verres qui m'ont donné des résultats assez nets. Les nombres rapportés ci-après indiquent les poids des substances fondues ensemble :

| | | | Couleur de la lumière émise dans le phosphoroscope par l'action de la lumière blanche. |
|---|---|---|---|
| 1°. | Silice | 1 | Verte. |
| | Potasse | 1 | |
| 2°. | Silice | 1 | Jaune-orangée. |
| | Chaux | 1 | |
| | Borax | 2 | |
| 3°. | Borax | 1 | Verte. |
| | Strontiane | 1 | |
| | Silice | 1 | |
| 4°. | Verre blanc | 4 | Verte, action vive. |
| | Alumine calcinée | 1 | |
| 5°. | Verre blanc | 2 | Verte ou rouge, suivant la vitesse du phosphoroscope. |
| | Alumine calcinée | 1 | |
| 6°. | Verre blanc | 1 | Rouge-orangé. |
| | Alumine calcinée | 1 | |

Le verre n° 5 donne aussi un changement de nuances en changeant la réfrangibilité des rayons actifs.

### § 6. *Sels d'uranium, platino-cyanures et substances diverses.*

*Sels d'uranium.* — La plupart des composés d'uranium, cristallisés ou à l'état cristalin, donnent une forte émission de lumière dans le phosphoroscope; on peut citer parmi eux le nitrate, les chlorures, le fluorure double d'uranium et de potassium, le silicate (verre d'urane), etc.; certains sels amorphes, comme l'uranate d'ammoniaque, ne sont pas lumineux d'une manière appréciable. La lumière émise est en général verte très-vive, et il faut arriver à une vitesse assez grande du phosphoroscope pour que l'effet soit à son maximum; cette vitesse, comme on l'a vu page 273 et suivantes est telle, qu'elle correspond à une persistance de 3 à 4 millièmes de seconde.

La composition de la lumière émise est très-remarquable : si l'on place dans l'appareil un fragment de nitrate d'urane, et qu'on analyse la lumière à l'aide d'un prisme en sulfure de carbone, on reconnaît que le spectre est formé de parties brillantes, ou lignes brillantes, séparées par des parties complétement obscures; le n° 14 fig. 39 représente cette image prismatique. On distingue huit bandes lumineuses : la 1re de couleur rouge est très-faible et se trouve comprise entre C et B; la 2e est un peu plus intense, et est rouge-orangée; la 3e est orangée et est tangente à D entre D et C; la 4e est jaune-verte; la 5e et la 6e sont vertes et la 7e bleu clair, car elle est tangente à F, et correspond à la partie

où le vert du spectre solaire finit et où le bleu commence ; la 8e est très-peu distincte : elle se compose d'une partie bleue assez rapprochée de la 7e bande, et a ses limites mal définies. En somme, parmi les huit parties lumineuses, 1 et 8 sont très-faibles et les six bandes intermédiaires, surtout 4, 5, 6 et 7, sont très-vives. Comme ces dernières ont une teinte plus ou moins verte, on comprend que le vert soit aussi la teinte dominante de la lumière émise avant la réfraction.

Ces huit bandes lumineuses ne sont pas tout à fait équidistantes : la 1re, la 2e, la 3e sont également espacées ; la 4e s'éloigne un peu plus de la 3e que les précédentes, ainsi que la suivante ; la 6e et la 7e sont encore plus espacées ; quant à la 8e, elle est assez voisine de celle qui la précède. Les différentes distances des lignes brillantes ont été prises au moyen du micromètre placé au foyer de l'oculaire de la lunette.

Le nitrate d'urane étant un corps très-lumineux dans le violet du spectre, on peut éclairer vivement un fragment de la substance avec les rayons ultra-violets et analyser la lumière émise pendant l'action des rayons ; on trouve alors la même composition qu'avec le phosphoroscope, et les huit bandes précédentes sont placées aux mêmes distances que précédemment. Cette identité de composition, ainsi qu'on l'avait déjà vu avec le rubis, prouve bien que l'effet lumineux observé dans les rayons ultra-violets et la phosphorescence observée dans le phosphoroscope sont un seul et même phénomène. Elle montre également que l'effet lumineux n'est pas dû à un état particulier qui suit seulement l'action de la lumière, mais que cet effet existe sous l'influence de celle-ci, car sous l'action des rayons violets l'émission lumineuse verte a lieu d'une manière continue, comme en faisant usage du phosphoroscope.

On peut également observer cette disposition des raies brillantes en plaçant en avant de la lunette H (fig. 38, page 335) un petit cristal de nitrate d'urane et en projetant sur ce cristal un faisceau de rayons qui a traversé un écran bleu de sulfate de cuivre ammoniacal ; dans ce cas, non-seulement on voit les sept bandes représentées n° 14, mais entre F et G on aperçoit un espace éclairé par des rayons solaires bleus qui traversent le cristal, et cet espace est coupé de bandes noires qui paraissent continuer la succession des bandes brillantes de l'espace AF ; il semble que dans ces parties obscures la lumière bleue soit absorbée, et il est remarquable que cette absorption se fasse par des intervalles en rapport

avec les parties brillantes données par le corps lorsqu'il est placé dans la partie la moins réfrangible du spectre.

On a donné dans le chapitre III, page 315, les limites des parties actives du spectre solaire sur le nitrate d'urane : l'action commence à être sensible en F; elle est très-vive depuis F jusqu'en H, et se prolonge très-loin jusqu'en P.

Si l'on place sur la route des rayons incidents des écrans différemment colorés, on ne voit pas changer sensiblement la teinte du nitrate d'urane; ce résultat tient à ce que la couleur verte l'emporte beaucoup sur les autres nuances, et en outre, comme on vient de le dire, de ce que c'est seulement près de F, dans le bleu du spectre, que la matière commence à devenir impressionnable.

Un certain nombre de composés d'uranium jouissent des mêmes propriétés lumineuses que le nitrate, et entre autres le verre d'urane dans lequel l'oxyde est combiné à la silice. Si l'on analyse la lumière émise, on trouve un spectre dont les parties lumineuses ne sont pas nettement séparées les unes des autres comme avec le nitrate; la lumière émise par le silicate de potasse ou de soude est probablement la cause de ce manque de netteté. Néanmoins, les six bandes intermédiaires 2, 3, 4, 5, 6, 7 ont leurs positions bien indiquées aux places des bandes correspondantes données par le nitrate d'urane; 1 et 2 disparaissent dans la lumière qui est répandue uniformément dans tout le spectre.

Avec le fluorure double d'uranium et de potassium, le perchlorure d'uranium et l'uranite naturelle on a une émission de lumière verte, mais l'analyse conduit à la composition représentée n° 15. On voit sept bandes lumineuses, dont les cinq intermédiaires sont bien nettes et brillantes et 1 et 7 sont moins arrêtées et plus faibles; mais il est remarquable que les bandes lumineuses, aux mêmes places pour les trois matières que l'on vient de nommer, n'occupent pas les mêmes positions qu'en opérant avec le nitrate et le silicate. Ces bandes sont intermédiaires; 2 et 3 sont entre les positions des bandes analogues du nitrate d'urane et 5 et 6 sont plus rapprochées des bandes de même nuance de la fig. 15. On ne pourrait dire actuellement quelle est la cause de cette analogie de composition lumineuse avec ces composés d'uranium, et pourquoi l'on observe une série de bandes qui sont toutes repoussées, pour ainsi dire, du côté rouge? Le degré d'oxydation n'y est pour rien, le chlorure, le fluorure et le nitrate étant des composés à base de sesquioxyde.

Le double sulfate d'urane et de potasse présente une image prismatique pour ainsi dire intermédiaire entre les deux images 14 et 15 représentées sur la planche figure 39, les bandes lumineuses étant repoussées vers le rouge, mais moins qu'avec le chlorure et le fluorure. On peut vérifier le fait très-simplement : il suffit de superposer dans un très-petit tube de verre blanc à parois très-minces des fragments de cristaux de nitrate d'urane, de double sulfate et de perchlorure de cette base, et de fixer ce tube verticalement dans le phosphoroscope. En éclairant simultanément les trois fragments, et en analysant la lumière émise à l'aide de la réfraction, on voit les trois images prismatiques superposées avec leurs bandes respectives dans des positions différentes. Il est possible, d'après cela, que d'autres composés à base de ce métal présentent un système de bandes lumineuses situées dans d'autres positions que celles dont on vient de parler.

Je ne connais pas encore la cause des positions différentes occupées par les bandes lumineuses des divers composés d'uranium ; l'analyse des effets donnés par un plus grand nombre de combinaisons de ce métal pourra peut-être l'indiquer.

*Platino-cyanures.* — Les platino-cyanures alcalins et terreux constituent une classe de sels qui sont doués de propriétés optiques remarquables, et qui dans le violet du spectre s'illuminent de nuances très-vives et très-brillantes.

L'acide platino-cyanhydrique même donne un effet bien manifeste, et devient bleu dans les rayons ultra-violets. Le platino-cyanure de potassium offre une belle nuance bleue. Celui de barium, comme celui de calcium, présente une teinte verte très-vive. Le platino-cyanure de magnésium donne une nuance rouge également très-vive ; en élevant la température de ce dernier, il se déshydrate, devient vert dans les rayons ultra-violets, mais en reprenant de l'eau il reprend la nuance rouge. Indépendamment de ces effets, ces sels sont doués d'une action de surface qui est telle, qu'à la lumière du jour les rayons lumineux réfléchis offrent diverses nuances suivant la position des rayons incidents ; mais ces effets sont différents de ceux dont il est question ici.

Dans le phosphoroscope et jusqu'à la limite de 400 tours par seconde pour la vitesse de l'axe de cet appareil, ces matières ne donnent pas toutes des effets analogues à ceux observés dans les rayons ultra-violets : les platino-cyanures de barium, de calcium et celui de

magnésium chauffé préalablement, sont lumineux avec la même nuance verte dans le phosphoroscope et dans les rayons violets; celui de potassium manifeste une autre nuance, et le platino-cyanure de magnésium rouge ne donne aucune action appréciable. La teinte donnée par le platino-cyanure de potassium est jaune-verdâtre d'une nuance assez vive, et la couleur verte du platino-cyanure de magnésium rouge ne devient vive que lorsque l'action des rayons solaires réfractés par la lentille enlève à cette substance sa teinte rouge et lui donne la teinte verte: il est présumable que si l'appareil pouvait recevoir un mouvement de rotation plus rapide, au delà d'une certaine limite, ces deux derniers platino-cyanures prendraient les mêmes teintes que dans les rayons ultra-violets.

En éclairant les platino-cyanures à l'aide des rayons violets et en analysant la lumière émise, j'ai bien observé que le platino-cyanure de potassium présentait deux maxima d'intensité, mais en somme je n'ai pas reconnu de bandes brillantes ou de raies noires.

Le platino-cyanure de magnésium, quand il reste rouge, donne des rayons compris entre des limites du spectre voisines l'une de l'autre, et par conséquent des rayons d'une couleur rouge-orangée assez uniforme; ces limites sont l'une voisine de C, l'autre comprise entre C et D. Cette substance étant chauffée, n'émet plus que des rayons compris depuis D jusqu'en F et dont la teinte est verte.

Le platino-cyanure de barium donne un spectre assez long; l'action lumineuse est comprise entre C et D d'une part et F dans le commencement du bleu de l'autre. Le platino-cyanure de potassium présente dans les mêmes conditions une image allant depuis le rouge C jusqu'au violet, avec un indice d'un minimum d'action entre D et F; il est possible que la partie la moins réfrangible corresponde à la portion qui est visible dans le phosphoroscope, et que la partie la plus réfrangible ait au contraire une persistance moindre.

*Carbure d'hydrogène à teinte des sels d'urane.* — Les substances organiques telles que la chlorophylle, l'esculine, le sulfate de quinine, se comportent de même que plusieurs platino-cyanures; le bisulfate de quinine est lumineux jaune dans l'appareil, mais on n'obtient pas avec la plus grande vitesse de l'appareil la teinte bleu claire que donne cette matière dans le violet du spectre solaire. Il y a cependant une substance organique qui n'est pas dans le même cas : c'est un carbure d'hydrogène solide sous forme de paillettes, à teinte des sels d'urane, et qui a

été obtenu par M. Fritzsche. Ce corps est très-lumineux dans l'extrême violet du spectre; dans le phosphoroscope, il commence à devenir visible quand le disque est à son maximum de vitesse, et émet la même nuance verte; de plus, en analysant la lumière émise par le corps dans l'appareil ou bien lorsque ce corps reçoit la lumière ultra-violette, on trouve dans les deux cas la même composition. Le n° 13 donne le spectre de la lumière émise par cette substance; il se compose de 4 espaces lumineux 1, 2, 3, 4, séparés par trois bandes noires, celle du milieu était un peu plus large que les deux autres : le 1er espace lumineux est orangé, le 2e est orangé d'un côté et vert de l'autre, le 3e et le 4e sont verts. Il y a identité de composition de la lumière émise quand le corps est placé dans le phosphoroscope ou quand il est excité par les rayons ultra-violets du spectre, ainsi que cela a lieu pour le rubis, les sels d'urane, etc., ce qui montre que si l'on pouvait estimer avec l'appareil des intervalles de temps plus petits que $\frac{1}{4000}$ de seconde on rendrait lumineuses plusieurs des substances organiques citées plus haut.

La naphtaline donne l'exemple d'un carbure d'hydrogène solide qui est lumineux violet dans les rayons ultra-violets du spectre, et qui n'est pas visible dans le phosphoroscope.

*Acide borique.* — Je pourrais encore citer ici un grand nombre de corps, mais je me bornerai à l'acide borique. Cette substance quand elle est cristallisée est phosphorescente vert, mais ne donne qu'une image prismatique sans apparence de bandes obscures. Lorsqu'elle a été fondue préalablement, elle apparaît jaune dans le phosphoroscope avec une faible vitesse de rotation des disques, et cette teinte passe au verdâtre quand l'appareil tourne plus rapidement; lorsqu'on examine le spectre des rayons lumineux émis dans ce dernier cas, on observe quelques bandes noires qui traversent l'espace situé entre les raies noires F et G du spectre solaire; mais le peu d'intensité de la lumière émise n'a pas permis d'indiquer exactement leur position.

On peut représenter dans le tableau suivant les effets les plus remarquables donnés par les substances étudiées dans ce chapitre, en indiquant les différents changements de nuances quand on les place dans les différents rayons du spectre ou dans le phosphoroscope :

| CORPS IMPRESSIONNABLES. | TEINTE DE LA LUMIÈRE ÉMISE DANS LE PHOSPHOROSCOPE, lorsque le corps est éclairé par la lumière solaire. | lorsque le corps est éclairé par les rayons différemment réfrangibles depuis le violet jusqu'au rouge. | TEINTE de la lumière émise par le corps dans les rayons ultra-violets. | ÉTENDUE de la partie active du spectre solaire. |
|---|---|---|---|---|
| Diamant. | Jaune ou bleue suivant les échantillons et la vitesse du phosphoroscope. | Variable du bleu au jaune suivant les échantillons. | Bleue avec certains échantillons. | De D jusqu'à P. |
| COMPOSÉS alumineux. Alumine (amorphe ou cristallisée, coryndon, saphir). | Rouge. | Rouge. | » | De A à P. |
| Rubis et spinelle. | Rouge. | Rouge. | Rouge. | De A à P. |
| Disthène. | Rouge. | Rouge. | » | De A à P. |
| Topaze. | Rouge (persistance moindre qu'avec les corps précédents). | Rouge. | » | De A à P. |
| COMPOSÉS à base de chaux. Carbon. de chaux. | Orangée ou bleuâtre. | Bleuâtre et orangée. | » | De C jusqu'au delà de H. Varie avec les échantillons. |
| Fluorure de calcium. | Bleue, jaune-orangée et verte, suivant la vitesse du phosphoroscope. | Variable du bleu verdâtre au vert et à l'orangé. | Quelquefois bleue. | Id. |
| Phosphate de chaux (phosphorite). | Verte et orangée suivant la vitesse de l'appareil. | Variable du vert jaunâtre à l'orangé. | » | Id. |
| Silicate de chaux (wollastonite). | Rouge-orangée, et verte suivant la vitesse de l'appareil. | Variable du vert a l'orangé. | » | Id. |
| Leucophane. | Orangée. | Id. | » | » |
| Carbonate de strontiane. | Verte et orangée, suivant la vitesse de l'appareil. | Id. | » | » |
| Hydrate de potasse. | Bleuâtre et verte. | Variable du bleuâtre à l'orangé en passant par le vert et le jaune. | Id. | » |
| Silicate de potasse (verres divers). | Verte plus ou moins bleuâtre. | » | En général verdâtre. | » |
| Acide borique cristallisé. | Verte bleuâtre. | » | » | » |
| Nitrate d'urane, verre d'urane, chlorure d'uranium, phosphate, sulfate double d'urane et de potasse. | Verte. | Verte. | Verte. | De F à P. |
| Carbure d'hydrogène à teinte de sels d'urane. | Verte. | Verte. | Verte. | De F à P. |
| Bisulfate de quinine. | Jaune. | Jaune. | Bleu clair. | |
| Naphtaline. | Inappréciable. | » | Violette. | » |
| PLATINO-CYANURES. De magnésium. | Inappréciable. | » | Rouge. | » |
| De magnésium chauffé. | Verte. | Verte. | Verte. | » |
| De potassium. | Jaunâtre. | Jaunâtre. | Bleu clair. | » |
| De Barium. | Verte. | Verte. | Verte. | » |
| Sulf. alcalino-terreux phosphorescents. | Lueurs diverses. | | | |
| Sulfure de zinc (blende hexagonale.) | Verte ou bleue (suivant la vitesse de l'appareil. | » | » | » |

On voit que l'étude attentive de la composition de la lumière émise par les corps phosphorescents conduit à cette conséquence importante, que les corps peuvent émettre simultanément des rayons lumineux de réfrangibilité différente pendant des temps bien inégaux, et que les raies brillantes ou obscures que présentent les corps rendus lumineux par action propre sont dépendantes de la nature de ces corps, leur état physique ne faisant varier en général que l'intensité de la lumière émise.

Les raies noires que l'on observe dans les images spectrales données par les rayons émis par certaines substances, et qui sont très-tranchées quand on emploie les rubis et les spinelles, doivent attirer particulièrement l'attention. En effet, dans cette circonstance, la lumière émise par ces corps en vertu de leur action propre ne traverse que la faible couche d'air qui les sépare de l'observateur ainsi que les verres des lunettes avec lesquelles on les observe; il faut donc, si ces raies sont dues à une absorption de rayons, que cette absorption ait lieu dans l'épaisseur même de la couche solide d'où émane la lumière, à moins qu'elles indiquent simplement une absence d'émission lumineuse. En tout cas, l'on voit que d'autres causes que l'absorption de la lumière par l'action de matières gazeuses ou de vapeurs incandescentes peuvent donner lieu à des raies noires dans les images prismatiques, comme on l'avait énoncé dans le livre IV, page 165; il pourrait donc se faire que des raies noires observées dans le spectre de certaines sources lumineuses ne provinssent pas des atmosphères gazeuses qui les environnent.

# CHAPITRE V.

## Influence de l'état et de la nature des corps sur les effets de phosphorescence par insolation. Extinction des rayons actifs; rayonnement des corps phosphorescents.

### § 1. *Influence de la température; action temporaire.*

L'intensité et la réfrangibilité de la lumière émise par une substance phosphorescente dépend autant de son état calorifique que de sa cons-

titution physique. On va voir en effet qu'à une température donnée une substance prend un état d'équilibre moléculaire d'après lequel elle émet des rayons de telle ou telle nuance pendant un certain temps avec une intensité déterminée, et est sensible entre des limites particulières de réfrangibilité. Cet état d'équilibre est temporaire, car lorsque les corps reprennent la température ordinaire, ils se retrouvent de nouveau dans les mêmes conditions d'émission lumineuse.

Tous les corps sous ce rapport ne présentent pas les mêmes effets, et sont plus ou moins modifiés temporairement par la chaleur. Une des substances qui présentent les modifications les plus grandes est le sulfure de strontium obtenu par la réaction du soufre sur la strontiane au-dessus de 500 à 600 degrés, et qui est lumineux violet à la température ordinaire (*voir* page 232); cette substance change de nuance pour de faibles différences de température, et revient à son état primitif quand on la ramène de nouveau à la température ordinaire.

Pour observer les effets produits, on a placé quelques fragments de ce sulfure dans un tube fermé par en bas, que l'on a plongé dans un bain d'eau ou d'huile, ou dans un mélange réfrigérant; puis l'on a comparé le tube chauffé à un tube semblable non chauffé, en les exposant pendant un temps très-court à la lumière et en les rentrant dans l'obscurité; on a eu, la température indiquée étant celle du sulfure à l'instant de l'insolation :

| TEMPÉRATURE. | COULEUR DE LA LUMIÈRE ÉMISE. |
|---|---|
| — 20° | Violette-foncée; phosphorescence vive. |
| + 20 | Violette, plus bleue. |
| 40 | Bleue claire. |
| 70 | Teinte légèrement verdâtre; à peine trace de bleu. |
| 90 | Jaune-verdâtre. |
| 100 | Jaune légèrement verdâtre. |
| 200 environ. | Orangée. La lumière émise est d'une intensité très-faible. |

Avec cette substance, à mesure que l'on opère à une température plus élevée, la lumière émise après l'insolation est donc de moins en moins réfrangible, et vers 200 degrés elle est analogue à celle qu'émet le sulfure de strontium préparé avec la strontiane et le soufre chauffés au-dessous de 500 degrés. On peut donc dire que le sulfure pris à diverses températures reproduit presque toutes les nuances prismatiques et par

conséquent tous les effets que l'on obtient d'une manière permanente, à la température ordinaire, avec les préparations diverses que j'ai fait connaître précédemment dans le chapitre Ier. C'est une nouvelle preuve à l'appui de l'opinion que j'ai énoncée, et d'après laquelle les effets divers de phosphorescence des sulfures d'une même base préparés différemment tiennent aux modifications dans l'état physique d'un même sulfure et non pas à la composition chimique différente de ces corps.

Dans le but de suivre aisément les effets dus à l'action de la chaleur sur les corps dans lesquels la persistance des impressions lumineuses est de courte durée, j'ai placé une hélice en fil de platine au milieu d'un phosphoroscope ; les bouts de cette hélice étaient convenablement isolés de la boîte de l'appareil, de sorte qu'à l'aide d'un courant électrique dont on faisait varier l'intensité suivant le nombre des couples employés, on élevait plus ou moins la température du fil pendant tout le temps du passage du courant. En plaçant les corps à étudier au milieu de l'hélice, et en les éclairant fortement au moyen de la lentille mise en avant du phosphoroscope, on a pu alors suivre l'émission lumineuse à des températures qui étaient comprises depuis la température ambiante jusqu'au rouge. A partir de ce terme, les corps devenant lumineux par eux-mêmes en vertu de leur élévation de température, on ne peut plus suivre les effets provenant de l'impression lumineuse incidente.

Si l'on échauffe à l'aide de l'hélice un fragment mince du sulfure de strontium précédent, et que l'on analyse la lumière émise par réfraction en examinant ce fragment au moyen d'un prisme et ainsi qu'on l'a indiqué page 335, on peut suivre ces changements, et reconnaître qu'ils ne proviennent pas uniquement d'une extinction graduelle de certains rayons réfrangibles, laissant seulement subsister des rayons dont la teinte était masquée par celle des premiers ; on trouve alors que de nouveaux rayons sont émis à une température déterminée, lesquels ne subsistent plus à la température ordinaire. Quand l'hélice de platine n'est pas échauffée, et que le sulfure est à la température ambiante, l'image prismatique se compose d'une partie bleue et violette, comprise depuis la raie du spectre solaire F jusqu'en H, et d'une partie orangée jaune et verte, la portion F n'ayant pas une intensité très-forte. Vers 30 ou 40° de température, les parties bleues et violettes disparaissent complétement, et il ne subsiste que l'image la moins réfrangible ; mais en élevant davantage la température, la partie orangée devient

plus vive et s'allonge du côté du rouge; arrivé entre 200 ou 300°, le corps n'émet plus de rayons perceptibles à la vue.

Il est facile de montrer d'une autre manière, que cette extension du spectre du côté du rouge ainsi que l'augmentation d'intensité lumineuse n'est pas apparente et ne tient pas à ce que, les parties bleues et vertes venant à disparaître, les portions moins lumineuses semblent plus vives; il suffit de prendre un verre rouge coloré par le protoxyde de cuivre et de regarder le sulfure au travers de cet écran; quand le sulfure est à la température ordinaire, à peine si on l'aperçoit, c'est-à-dire à peine s'il donne des rayons qui se transmettent au travers de cet écran : mais aussitôt que la température s'élève, l'image rouge gagne en intensité, ce qui prouve bien que l'extension du spectre tient à une plus grande émission des rayons de faible réfrangibilité.

Les autres sulfures alcalino-terreux présentent des effets du même genre, mais à des degrés moins marqués. Les expériences suivantes indiquent la couleur de la lumière émise par plusieurs d'entre eux, la température étant fixe au moment de l'insolation.

On a d'abord opéré avec les préparations de sulfure de calcium indiquées ci-après :

1° Le sulfure de calcium rouge-orangé, provenant des coquilles d'huître simplement calcinées.

2° Le sulfure jaune préparé avec le spath d'Islande et le soufre.

3° Le sulfure lumineux vert très-vif.

4° Le sulfure lumineux vert-bleuâtre (1).

5° Le sulfure bleu-indigo préparé avec le persulfure de potassium et les coquilles d'huître.

6° Le sulfure violet.

On a eu aux températures suivantes :

(1) Le sulfure de chaux qui change avec la température et devient bleu-indigo peut être obtenu de différentes manières : 1° en calcinant avec le soufre le carbonate de chaux préparé au moyen du nitrate de chaux dissous et du carbonate d'ammoniaque, mais le nitrate de chaux étant donné par la réaction de l'acide nitrique sur la chaux provenant de la craie; 2° par l'action du persulfure de potassium sur certaines parties des coquilles d'huître calcinées.

| | A — 20°. | Entre 16 et 20°. | A 100°. | E. 100 et 200°. |
|---|---|---|---|---|
| N° 1. Sulfure orangé.. | Rouge-feu, couleur plus vive qu'à + 20. | Rouge-orangé..... | Rouge - orangé, lumière faible. | Eff. très-faible. |
| N° 2. Id. jaune... | Jaune..... | Jaune..... | L'intensité lumineuse diminue, la teinte ne varie pas. | |
| N° 3. Id. vert.... | Verte..... | Verte..... | Verte, lum. plus vive qu'à + 20°. | Jaune-verdâtr. |
| N° 4. Id. vert-bleuâtr. | Verte, légt. bleuâtre. | Verte, légt. bleuâtre lumière faible. | Verte, légt. bleuâtre. | Bleue indigo. |
| N° 5. Id. bleu.... | La teinte est à peu près la même aux différentes températures; l'intensité seule est différente. | | | |
| N° 6. Id. violet... | | Id. | | |

Les sulfures de strontium qui ont servi aux expériences sont :

1° Le sulfure lumineux jaune obtenu avec la strontiane et le soufre au-dessous de 500°.

2° Le sulfure vert préparé par le carbonate et le soufre.

3° Le sulfure bleu clair : id.

4° Le sulfure violet préparé par la strontiane et le soufre au-dessus de 500°. On a eu :

| | A — 20°. | Entre 16 et 20°. | A 100°. | Entre 100 et 200°. |
|---|---|---|---|---|
| N° 1. Sulfure jaune... | (La teinte jaune est à peu près la même jusqu'à 100°)... | | | Verdâtre. |
| N° 2. Sulfure vert.... | Verte (belle lumière).. | Verte..... | Verte..... | Bleuâtre. |
| N° 3. Id. bleu clair. | (La teinte varie peu jusqu'à 100°..... | | )... | Verdâtre. |
| N° 4. Id. violet.... | Les résultats sont compris dans le tableau de la page 386. | | | |

Les sulfures de barium qui ont été employés sont :

1° Le sulfure lumineux jaune-orangé.

2° Le sulfure vert préparé par le carbonate de baryte et le soufre.

Le 1er sulfure a conservé à peu près la même teinte aux différentes températures depuis — 20° jusque près de 200°.

Le second à — 20° a donné une lumière verte très-vive ; à + 20° cette lumière est restée verte, et il a conservé encore cette couleur à + 100°, mais entre 100 et 200° la teinte est devenue jaune-verdâtre.

On voit que deux des sulfures de calcium sont fortement influencés par la chaleur : le rouge-orangé et le vert dont on indique la préparation. Le premier est beaucoup plus brillant à — 20° et ensuite, quand on élève sa température, sa teinte ne change pas, mais l'intensité lumineuse diminue; le second tourne au bleuâtre vers 100°, mais entre 200 et 300 il devient franchement bleu-indigo, et offre la même teinte que le sulfure bleu-indigo n° 5 indiqué page 231. Ce résultat est à signaler, car on obtient ici à volonté, mais temporairement, le même effet que l'on produit accidentellement, d'une manière permanente,

par la réaction du persulfure de potassium à haute température sur la chaux. Du reste, on va voir que l'analyse de l'action du spectre conduit à admettre que dans les deux cas on a le même phosphore.

Le sulfure de calcium vert, dont la nuance est si belle et si vive, ne change pas de la même manière et donne seulement du jaune-verdâtre à une haute température. Quant au sulfure bleu-indigo, au sulfure violet, ainsi qu'au sulfure jaune-orangé, la teinte de la lumière qu'ils émettent varie peu, et l'on n'obtient que des changements dans l'intensité et dans la durée de la phosphorescence.

Les sulfures de strontium autres que le violet, et ceux de barium, n'offrent que peu de différences; le sulfure vert de strontium à une haute température tourne au bleuâtre, celui de barium devient au contraire jaunâtre. Ainsi, pour quelques-unes des matières phosphorescentes, les rayons émis lorsque leur masse est maintenue à une température élevée sont plus réfrangibles qu'à la température ambiante, et pour d'autres ils le sont moins; il n'y a aucune règle générale à cet égard.

L'intensité et la durée de la phosphorescence changent également comme la réfrangibilité quand les corps sont maintenus à diverses températures, mais d'une manière inégale pour chaque substance. Avec le sulfure de calcium lumineux rouge, l'intensité et la durée sont plus grandes à — 20° qu'aux autres températures; pour le phosphore lumineux vert très-brillant, cette intensité est plus grande à 100° qu'à + 20, mais la lumière émise dure moins longtemps qu'à cette température; vers 200° l'intensité lumineuse en général est moindre pour tous les phosphores qu'à la température ordinaire, mais avec le sulfure de calcium lumineux verdâtre faible, l'intensité de la lumière bleu indigo est assez forte.

En général, à basse température, les substances reçoivent presque toutes une somme d'action plus grande de la part de la lumière, et ensuite elles luisent pendant plus longtemps; la durée de l'émission est donc moindre à mesure que la température est plus élevée. Pour le montrer il suffit de placer des sulfures phosphorescents dans une capsule et de les soumettre à un abaissement de température; après leur insolation ils luisent vivement, et une fois leur lumière affaiblie, en les amenant à la température ordinaire la lumière s'avive absolument comme si on les chauffait. D'un autre côté, les différents rayons dont se compose la lumière émise par les corps n'offrent pas la même durée, puisque nous avons dit plus haut que les nuances violettes et

bleues paraissent s'éteindre les premières : tel est l'effet que produit le sulfure de strontium violet, qui est plus violet dans le phosphoroscope qu'il ne l'est quand on le regarde à l'obscurité quelques instants après l'insolation.

Il était intéressant d'examiner quel est le mode d'action du spectre sur ces substances et surtout sur le sulfure de calcium qui devient bleu-indigo de 200 à 300°, car ce phosphore à longue persistance est le seul jusqu'ici que j'aie trouvé pour ainsi dire à l'unisson des rayons actifs, puisque la partie où il est impressionné dans le spectre a la même couleur que celle des rayons qui sont émis par phosphorescence. J'ai placé cette matière dans un tube à parois minces de façon à l'emplir, et j'ai projeté un spectre sur le tube, de sorte que la longueur du spectre fût parallèle à la direction du tube. J'ai noté la position des parties actives et j'ai reconnu qu'il y avait deux espaces lumineux, de même que dans les n$^{os}$ 3 et 4, de la figure 32, relatives au sulfure de calcium, le premier ou le moins réfrangible étant moins étendu et moins lumineux que le second, et tous deux donnant une teinte verdâtre faible. En élevant alors la température du tube à l'aide d'une lampe à alcool, vers 200° l'effet du spectre a changé, et le premier espace lumineux ou le moins réfrangible est devenu plus étendu et a pris une belle teinte bleue-indigo vive après l'action de la partie active de l'image prismatique; en élevant davantage la température, le résultat a encore été le même : l'image de la partie active du spectre a été semblable à celle du n° 5 de la fig. 32, et la matière a donné deux nuances différentes par l'action de deux parties d'inégale réfrangibilité. Il résulte de là que l'action du spectre, comme la simple comparaison des rayons lumineux émis après l'action de la lumière diffuse, montre que le sulfure de calcium, qui donne lieu à cet effet lorsqu'il est chauffé, se comporte temporairement à la température ordinaire comme le composé obtenu, dans certaines conditions, par la réaction du persulfure de potassium sur la chaux.

On peut juger approximativement et de prime abord quand une substance phosphorescente change de teinte avec la température; il suffit d'insoler un fragment de cette substance et de le projeter sur une pelle en fer chauffée à 300 ou 400°, ou bien dans un canon de pistolet dont la culasse est maintenue à cette température; ce fragment devient très-lumineux pour cesser promptement de l'être, la chaleur activant beaucoup l'émission lumineuse; mais si lors de cette émission sa nuance

change, on peut être assuré que ce changement est dû aux variations calorifiques qui font passer le corps par une succession d'états différents sous le rapport de la phosphorescence. En effet, avec des fragments des sulfures cités plus haut, on retrouve successivement les teintes diverses dont nous avons parlé, c'est-à-dire des changements de couleur et d'intensité pour quelques-uns, et des changements seuls d'intensité pour d'autres. Il est même possible que le fluorure de calcium, qui offre des variations de teinte quand on le chauffe, puisse présenter des effets analogues en l'exposant à l'action de la lumière à des températures différentes; mais les actions lumineuses que présente ce corps sont trop faibles pour vérifier s'il en est ainsi. On voit donc, d'après ce qui précède, qu'à une température déterminée une matière phosphorescente prend un état d'équilibre temporaire qui en fait pour ainsi dire un phosphore spécial.

La plupart des substances minérales éprouvent des modifications analogues de la part de la chaleur, tant dans la réfrangibilité que dans l'intensité des rayons émis; mais ces changements sont plus ou moins grands et dépendent de la nature des corps. Quelques-uns, comme le spath d'Islande, donnent peu de changements depuis la température ordinaire jusqu'au rouge : si l'on choisit un fragment de spath d'Islande de la variété prismatique que l'on place au milieu de la spirale en platine, fragment qui donne une belle teinte orangée dans le phosphoroscope, on trouve que cette teinte devient un peu plus verdâtre à mesure que la température s'élève, et au rouge naissant à peine si l'intensité semble diminuée; en revenant à la température ordinaire, la nuance redevient orangée.

Ce corps présente au reste une particularité assez curieuse; on sait (1) que certains échantillons de chaux carbonatée, tels que les cristaux inverses, de même que l'arragonite, paraissent assez vivement lumineux vert dans le phosphoroscope, et que cette lumière verte offre pour ainsi dire un second effet lumineux du carbonate de chaux, différent de celui que présente le spath rhomboédrique; à une température qui n'est pas élevée et ne dépasse pas beaucoup 100°, toute émission de rayons verts cesse, et le corps devient inactif. Ainsi par l'action de la chaleur l'émission de rayons rouges orangés de courte durée persiste, et celle des rayons verts de longue durée est rapidement détruite d'une manière temporaire.

(1) *Annales de chimie et de physique*, t. 57, p. 38 et suivantes.

La chaux qui provient du spath d'Islande fortement calciné, et qui est assez lumineuse, comme on le verra plus loin, présente des effets analogues à ceux du carbonate de chaux orangé; elle devient verdâtre près de la température rouge sombre, sans diminuer sensiblement d'activité. La combinaison de cette substance avec l'acide carbonique ne paraît donc pas modifier les effets de persistance que la lumière exerce sur elle.

Le spath-fluor (fluorine verte très-lumineuse) préalablement calciné ne perd pas sensiblement d'activité lorsqu'on élève sa température jusque près du rouge sombre; sa nuance seule est un peu différente, car la teinte bleue foncée qui se manifeste à l'aide du mouvement lent du phosphoroscope devient seule plus faible; les teintes jaunes et vertes conservent à peu près la même intensité.

Les cristaux de spath-fluor du Dersbyshire, dont la teinte est verte ou violette, offrent quand on les regarde sous certaines incidences une teinte bleue très-belle, qui est due, comme on l'a vu antérieurement, page 316, à une phosphorescence de courte durée; aussi cette lumière bleue apparaît-elle avec beaucoup de pureté et d'intensité dans la partie ultra-violette du spectre solaire. Lorsqu'on élève la température de ces cristaux jusque près du rouge sombre, M. Jannetaz a observé que ce phénomène cesse de se produire et qu'ils n'émettent plus de lumière bleue ; en les laissant revenir à la température ordinaire ils reprennent de nouveau leur propriété comme précédemment. Il est nécessaire, quand on fait cette expérience, de ne maintenir l'élévation de température que pendant peu d'instants, car si l'action calorifique persistait pendant quelque temps, ainsi qu'on l'a déjà dit dans le livre IV, toute couleur serait détruite dans le spath-fluor, aussi bien la couleur bleue que la teinte propre verte ou violette de la matière.

Ainsi l'action temporaire de la chaleur fait cesser dans les cristaux de spath-fluor dont il s'agit l'émission de la lumière bleue due à une persistance de courte durée des impressions lumineuses ; mais ces cristaux placés dans le phophoroscope conservent, comme les cristaux de fluorine verte dont il vient d'être question, la propriété de donner des rayons de moindre réfrangibilité malgré l'élévation de leur température.

On voit donc qu'avec les différentes substances citées dans ce paragraphe l'action temporaire de la chaleur s'exerce principalement sur l'émission des rayons très-réfrangibles; mais néanmoins il y a des corps dans lesquels cette action se fait sentir également sur les rayons de

moindre réfrangibilité, et qui peuvent devenir tout à fait inactifs vers 300 ou 400° ; je citerai notamment l'alumine, qui précipitée et calcinée ou bien à l'état de coryndon donne une lumière de moins en moins vive, mais toujours de même teinte, à mesure que la température s'élève ; le verre ordinaire, le verre d'urane, etc., sont dans le même cas.

§ 2. *Influence de la température ; modification permanente.*

La chaleur ne donne pas seulement lieu dans les corps à une action temporaire, mais elle peut encore produire des modifications permanentes ; en général son action augmente l'activité des corps quand ils sont soumis ensuite à l'influence du rayonnement lumineux. On a vu dans le livre II, page 30, quelles ont été les expériences faites par Michel de Grosser sur le diamant, ainsi que les recherches de Dufay sur le même sujet. Les effets que l'on observe avec l'alumine et la chaux, et que je vais indiquer, peuvent montrer quelle est la limite de cette influence.

Lorsque l'alumine est précipitée à l'état de gelée et est hydratée, elle ne donne pas sensiblement lieu à une émission de lumière, ou du moins on observe seulement une faible lueur verdâtre dans le phosphoroscope. Si on la calcine à une température élevée dans un fourneau à vent, elle acquiert le pouvoir d'émettre de la lumière rouge dont la composition a été donnée précédemment ; mais dans cet état son action est assez faible.

Si l'on choisit au contraire de l'alumine très-pure provenant de l'alun ammoniacal, et que l'on divise cette alumine en plusieurs parties, on peut, en la combinant avec des acides purs, faire du sulfate, de l'azotate, de l'acétate, de l'oxalate et d'autres sels à base d'alumine. En calcinant alors séparément dans un même fourneau à vent ces différents sels, ils donnent tous de l'alumine, mais qui est inégalement active. Celle qui provient du sulfate est toujours moins lumineuse que celle qui provient de l'acétate ou du nitrate, dont l'éclat approche de celui que donnent les rubis les plus brillants. Cependant, ces divers échantillons sont également purs, et on ne peut y supposer que des états moléculaires différents ; il est remarquable de voir que la différence due à ce que divers composés d'alumine servent à la préparation de cette matière persiste même après l'action d'une température très-élevée et prolongée pendant longtemps.

On trouve également parmi les coryndons naturels des différences

très-grandes; ils sont pour ainsi dire tous lumineux, mais les rubis le sont plus vivement que les saphirs ou que les coryndons légèrement verdâtres qui contiennent du fer. Cependant, lorsque les coryndons limpides et incolores sont à peine lumineux, il suffit de les porter à une température très-élevée pour augmenter leur activité lumineuse.

Voici, du reste, la mesure des intensités lumineuses données par les différentes préparations d'alumine en plaques minces de $0^{mm},1$ environ et par les cristaux de coryndon qui ont servi aux expériences indiquées dans le chapitre III, page 280.

| | |
|---|---|
| Coryndon (rubis) limpide taillé..... | 100,00 |
| Coryndon translucide (autre rubis)..... | 61,65 |
| Alumine provenant de la calcination du nitrate (les points les plus brillants seulement)..... | 23,50 |
| Alumine provenant de la calcination de l'acétate. | 5,18 |
| Lame de coryndon limpide et blanche (préparée artificiellement).. ..... | 1,85 |
| Coryndon blanc naturel (parfaitement limpide).. | 0,16 |

On ne peut pas dire que l'émission de lumière de l'alumine ou des coryndons soit due à une matière étrangère mélangée à ces corps, car il faut remarquer que si l'intensité de la lumière émise est variable, la composition de cette lumière reste la même, comme je l'ai démontré antérieurement; on obtient ce résultat avec des rubis, des coryndons limpides, de l'alumine précipitée et calcinée, ou de l'alumine cristallisée artificiellement. D'un autre côté, comme on l'a déjà vu, p. 280, le rapport du pouvoir émissif de cette matière à sa capacité pour la lumière est sensiblement le même pour l'alumine préparée chimiquement aussi pure que possible et pour les coryndons naturels, et il n'est pas possible de supposer que la substance étrangère qui serait mélangée à l'alumine serait toujours la même, quelle que fût la provenance des coryndons naturels ou quel que soit le mode de préparation que l'on puisse employer.

La seule conséquence que l'on puisse tirer de ces expériences, c'est que dans le phénomène de phosphorescence, qui et un phénomène intimement lié à la nature des corps, la composition et la loi d'émission de la lumière restent les mêmes pour le même corps, quel que soit son mode de préparation, à égalité de température, mais que l'intensité de la lumière émise est essentiellement variable et dépend d'un arran-

gement moléculaire qui peut être différent suivant des circonstances que l'on ne peut toujours apprécier. En ce qui concerne l'alumine, il est curieux de remarquer que la présence de l'acide chromique, qui colore ce corps en violet ou en rouge, augmente l'intensité de la lumière émise; cependant, ainsi que je l'ai reconnu, l'alumine pure provenant de la calcination de l'acétate donne une matière qui approche beaucoup des rubis les plus brillants. En tout cas, comme je l'ai déjà dit, la composition de la lumière émise ne varie pas dans l'un ou l'autre cas.

La chaux donne lieu à des effets du même genre que ceux présentés par l'alumine. J'ai déjà insisté sur les effets différents présentés par les différents modes de préparation du carbonate de chaux; d'un autre côté l'arragonite, comme les cristaux de chaux carbonatée inverse, donnent une émission de lumière verte persistante au lieu de présenter une teinte orangée. Si l'on calcine ces différents carbonates de chaux dans des creusets placés dans un fourneau à vent et que l'action de la chaleur soit suffisamment prolongée, ils sont complétement transformés en chaux. Pour pouvoir observer leur action dans le phosphoroscope, il faut en prendre des fragments très-minces, ou bien placer sur une lame de mica de très-petits grains que l'on y fait adhérer avec une très-légère couche d'un corps gras. Ces échantillons sont tous lumineux orangé, mais avec des intensités bien inégales; celle qui provient de l'arragonite ne donne qu'une faible émission du lumière ; celle qui provient des cristaux spathiques est au contraire très-lumineuse. D'un autre côté, la chaux ordinaire provenant de la calcination du calcaire compacte dans des fours à chaux n'est pas impressionnable d'une manière sensible; chauffée fortement dans un fourneau à vent, elle présente une faible émission de lumière orangée; la chaux provenant de la calcination du nitrate s'est comportée de même. En somme, l'action de la chaleur sur le carbonate de chaux et sur la chaux augmente l'activité de ces substances ; mais si la couleur de la lumière émise par les différentes préparations d'un même composé ne change pas, l'intensité lumineuse varie suivant la nature et la constitution des sels de chaux qui ont servi à faire ces préparations.

D'autres substances, comme la magnésie, présentent des effets analogues. Le spath-fluor peut également se comporter de même, car des échantillons de cette matière sont devenus plus lumineux dans le phosphoroscope après une calcination préalable.

### § 3. *Influence de l'état du corps ; état solide et état liquide. Forme cristalline.*

Si l'on place le phosphoroscope dans une chambre parfaitement noire, que l'on éclaire très-vivement les corps avec les rayons solaires concentrés à l'aide d'une lentille, il y a bien peu de substances solides transparentes, surtout à base alcaline et terreuse, qui ne présentent quelque trace de lumière ; mais quand un corps ne donne lieu à aucune action appréciable, quelquefois en modifiant son état physique ou en le préparant dans des circonstances déterminées on peut trouver qu'il devient impressionnable. Ainsi l'on a vu antérieurement que le quartz limpide et incolore est inactif : mais le quartz opale peut présenter une émission lumineuse assez marquée, surtout la variété opale résinite dont les couleurs changeantes ne paraissent pas dues à un effet de réseaux ; il serait même possible que l'opalescence manifestée par ce corps dans cette circonstance ne provînt que d'une émission de rayons lumineux en vertu d'une action propre.

Les corps quand ils sont à l'état solide se trouvent, comme on l'a déjà vu, dans les conditions les plus favorables pour que les effets de persistance d'impression lumineuse puissent se manifester ; quelques liquides organiques peuvent présenter des effets de phosphorescence de ce genre, puisque la dissolution de bisulfate de quinine est très-lumineuse dans la partie ultra-violette du spectre, ainsi que des dissolutions de chlorophylle, d'esculine et d'un grand nombre de matières organiques ; mais la durée de la persistance des impressions lumineuses est beaucoup plus courte qu'avec les corps solides, puisque le phosphoroscope que j'ai fait construire n'a pas encore accusé d'effets de lumière, et qu'il faut l'action continue des rayons violets pour les manifester. Il résulte de là que, sauf dans des circonstances déterminées, l'état liquide semble contraire à l'état physique qui convient à la manifestation du phénomène. On en a la preuve en faisant fondre par une faible élévation de température des corps tels que le nitrate d'urane, l'hydrate de potasse, etc., qui sont très-vivement lumineux, car aussitôt ils cessent d'être visibles dans le phosphoroscope ; quand ils sont revenus à l'état solide, l'action lumineuse apparaît de nouveau.

Les gaz semblent se trouver, comme les liquides, dans des conditions autres que celles nécessaires pour la conservation d'un état vibratoire

capable de donner une émission de lumière si ce n'est dans des circonstances qui ont été indiquées page 192, lors de la transmission des décharges électriques dans les gaz raréfiés.

Les corps qui sont impressionnables et que l'on peut préparer à basse température par voie de cristallisation, sans que l'eau de cristallisation influe sur les effets lumineux, ne donnent pas plus de variations dans l'intensité que dans la composition de la lumière émise, et se présentent toujours identiques à eux-mêmes ; cela est facile à concevoir. Tel est le cas des sels d'urane, des platino-cyanures cristallisés, du bisulfate de quinine, etc... Mais les corps dont les formes cristallines sont modifiées lors de la cristallisation, par suite de circonstances qui échappent souvent aux observations, présentent par cela même des variations dans l'action qu'ils exercent sur la lumière.

Les cristaux naturels de carbonate de chaux sous ce rapport offrent de grandes différences ; l'on a vu précédemment, page 355 et suivantes, que suivant leur forme dominante il pouvaient donner lieu à une émission de rayons de diverse réfrangibilité, et cela avec des durées inégales. On peut ajouter ici quelques détails à ceux qui ont été données plus haut ; ils résultent des observations que j'ai pu faire avec des échantillons appartenant à la collection du Muséum d'histoire naturelle.

La plupart des cristaux de carbonate de chaux qui dérivent des formes prismatiques, ceux qui proviennent des modifications connues sous le nom de métastatiques, ou bien des modifications du rhomboèdre primitif conduisant à l'équiaxe, donnent tous la teinte orangée, les formes prismatiques donnant l'intensité la plus grande. Les rhomboèdres inverses ou ceux en rhomboèdres aigus, appelés rhomboèdres mixtes par Haüy, donnent la teinte verte persistante, analogue à celle que présente toujours l'arragonite. Quelques cristaux, surtout de ceux qui offrent la forme analogique prismée, ont donné la teinte orangée dans tout le corps du cristal, avec l'extrémité bleue-verdâtre ; j'ai même observé, avec un certain nombre de cristaux provenant d'un même échantillon, que ce pointement donnait dans le cristal trois lignes d'une teinte verte plus vive, convergeant vers la pointe, et semblant indiquer à l'intérieur une disposition moléculaire particulière, qui n'était pas appréciable par un autre moyen.

On ne peut dire que les deux états particuliers du carbonate de chaux que l'on distingue à l'aide de la couleur de la lumière émise par action propre tiennent à la forme cristalline de ce corps ; mais les causes

qui dans une région déterminée ont amené la cristallisation à se faire de telle ou telle manière ont donné lieu aux dispositions moléculaires d'ou résultent les effets lumineux signalés plus haut.

### § 4. *Influence de la direction des rayons incidents. Extinction des rayons actifs.*

Dans les expériences dont les résultats ont été rapportés précédemment, j'ai supposé que les rayons solaires incidents tombaient perpendiculairement sur la surface des corps transparents taillés, ou bien de ceux opaques qui étaient en poussière et placés sur du mica. S'il est nécessaire que la lumière pénètre à une certaine profondeur pour exciter les molécules, il est évident que sur une surface polie un même faisceau lumineux donnera un effet plus ou moins marqué, suivant qu'il sera incliné de telle ou telle manière, et que par suite de la polarisation du rayon incident il s'en réfléchira des quantités différentes.

Pour vérifier cette supposition, on a fixé dans le phosphoroscope une lame de verre d'urane bien plane, dont on pouvait faire varier la position par rapport à celle du faisceau incident; puis on a polarisé la lumière incidente en faisant passer le faisceau de rayons solaires au travers d'un prisme de Nicol. En inclinant alors plus ou moins la petite lame de verre, j'ai constaté que lorsque le plan de réflexion sur le verre était parallèle au plan de polarisation, et que l'incidence se trouvait de 35° environ avec la surface, auquel cas une grande partie de la lumière incidente était réfléchie, alors on avait le minimum d'effet lumineux transmis par phosphorescence, effet de lumière dû à l'action propre du verre et que l'on mesurait avec le photomètre; en mettant le plan de réflexion perpendiculaire au plan d'incidence, ce qui fait que la lumière ne se réfléchit plus que très-faiblement et est éteinte en partie, on a le maximum d'effet dans le phosphoroscope, ce qui prouve dans ce cas que le maximum d'action est communiqué par la lumière incidente à la substance active.

Ainsi il ne suffit pas que la lumière tombe sur la surface d'un corps, et il est nécessaire qu'elle pénètre à une certaine profondeur dans ce corps pour que les molécules qui sont situées près de sa surface puissent être impressionnées. Quand elle pénètre alors dans les corps impressionnables, la portion active qui lui communique une influence est éteinte en proportion de l'effet qui est produit, et si le corps impression-

nable est transparent, au-delà d'une certaine profondeur, dépendant de la nature du corps, il ne se transmet plus que les rayons qui n'exercent plus d'action sur lui. Tel est l'effet qui a lieu quand la lumière tombe sur un écran liquide contenant du bisulfate de quinine ; au-delà d'une certaine limite, les rayons transmis quand ils tombent sur un second écran semblable ne donnent plus l'émission de lumière bleue que produisent les rayons ultra-violets ; si l'on observe encore une action, une épaisseur plus grande encore la détruirait, et il ne resterait plus dans le faisceau que des rayons lumineux dont l'extinction n'aurait pu avoir lieu.

Mais si l'on faisait agir le faisceau ainsi tamisé sur une autre matière impressionnable, et que cette dernière soit sensible entre les mêmes limites de réfrangibilité, elle ne présenterait aucune action ; si au contraire elle était sensible entre d'autres limites de réfrangibilité, elle pourrait devenir active, car les rayons qui l'exciteraient n'auraient pas été éteints.

Il en est de même si l'on agit par réflexion irrégulière ou par diffusion et que l'on étudie les rayons qui ont échappé à l'absorption, au moyen des phénomènes de phosphorescence, ou à l'aide des actions chimiques dont il sera question dans la seconde partie de l'ouvrage, lesquelles ont lieu en général dans les parties les plus réfrangibles du spectre lumineux. Ainsi, lorsque l'on réfracte un faisceau de rayons solaires au travers d'un prisme, et que l'on projette le spectre sur une surface, celle-ci est éclairée dans toute l'étendue de l'image prismatique ; mais si cette surface est enduite d'une substance comme le bisulfate de quinine ou un platinocyanure, ou encore un sulfure phosphorescent, aussitôt on voit la partie violette et ultra-violette devenir brillante et émettre des rayons de nuances différentes, en raison d'une transmission de mouvement vibratoire à ces matières impressionnables. Cet effet doit donc être suivi d'une diminution dans la quantité de rayons dont la réfrangibilité correspond à l'extrême violet et qui peuvent être émis par diffusion en tous sens, rayons qui sont doués d'une activité chimique puissante sur un grand nombre de matières.

Il résulte de là que si dans une chambre noire disposée pour les images photographiques, on reçoit au foyer l'image du spectre éclairant ainsi différents corps impressionnables, on pourra juger, d'après les épreuves photographiques obtenues, si la partie ultra-violette est plus ou moins active après ou avant son action sur les matières phosphorescentes. En

opérant de cette manière et en recevant les images photographiques sur des plaques daguerriennes, on reconnaît que lorsque le spectre solaire frappe une surface enduite d'une matière phosphorescente très-active, la portion du spectre où la phosphorescence a lieu ne donne sur l'épreuve photographique qu'une impression plus faible que sur la même surface qui n'est pas recouverte de matière, preuve du changement de réfrangibilité et de la diminution dans la quantité de rayons qui affectent les matières impressionnables.

### § 5. *Rayonnement des corps phosphorescents. Effets chimiques, phosphorogéniques et calorifiques produits par son action.*

Lorsque les corps sont placés dans le phosphoroscope et qu'ils émettent des rayons à des intervalles assez courts pour qu'ils semblent agir d'une manière continue, ces rayons, comme ceux qui émanent des sources naturelles et artificielles, exercent d'autres actions que celle qui consiste à impressionner la rétine. Ils excitent de nouvelles vibrations dans les corps, c'est-à-dire qu'ils donnent lieu à des phénomènes de phosphorescence; ils produisent des réactions chimiques sur les matières impressionnables; enfin, ils devraient donner lieu à des effets calorifiques s'ils avaient une intensité suffisante et une réfrangibilité convenable.

La rétine étant excessivement impressionnable peut percevoir des rayons d'une très-faible intensité : aussi les effets optiques et les lois qui règlent la marche des rayons lumineux ont-ils servi de guide dans l'étude des autres effets produits sous l'influence de la lumière.

Les phénomènes de phosphorescence viennent ensuite dans l'ordre d'impressionnabilité, comme étant ceux qu'il est le plus facile de manifester sous l'action d'un rayonnement d'une faible intensité. Il est facile en effet de démontrer que l'action des corps placés dans le phosphoroscope peut exciter de nouveau la phosphorescence sur les matières très-lumineuses : à cet effet, au moment où le phosphoroscope est en rotation, l'on approche de l'ouverture de cet appareil, dans la chambre noire, les matières phosphorescentes, comme les sulfures de calcium ou de strontium; en employant comme substances actives placées intérieurement le nitrate d'urane, la potasse caustique, le bisilicate de potasse, le sulfure de calcium bleu ou le sulfure de strontium bleu-violet, il suffit de maintenir les matières phosphorescentes

à longue durée pendant un temps assez court dans le voisinage de ces dernières pour reconnaître qu'elles émettent ensuite de la lumière dans l'obscurité; cette lumière est faible, il est vrai, mais néanmoins elle prouve que le rayonnement dû aux substances placées dans le phosphoroscope, et agissant comme sources lumineuses, peut exciter de nouveau la phosphorescence. Dans ces expériences, les substances qui émettent des rayons bleus et violets sont plus actives que les autres, en raison de la grande réfrangibilité des rayons émis.

Les effets chimiques produits par la lumière sur les corps les plus impressionnables demandent en général une certaine intensité lumineuse, et un temps suffisant pour que la réaction soit manifeste. Le mode d'opération qui m'a réussi le mieux consiste à préparer des plaques de verre sur lesquelles on fixe du collodion préparé avec de l'iodure de potassium et du nitrate d'argent, de façon à avoir une sensibilité très-grande, et à placer les plaques d'une manière fixe très-près de l'ouverture du phosphoroscope dans la chambre noire; quand on fait tourner la roue de cet appareil, la lumière émise par le corps situé à l'intérieur peut agir immédiatement sur la couche impressionnable, et en plongeant celle-ci dans une dissolution de protosulfate de fer, on voit apparaître l'image de l'ouverture si l'intensité chimique des rayons émis a été suffisante. En employant successivement comme substance active le sulfure bleu de strontium, le sulfure bleu de calcium, l'azotate d'urane, après une demi-heure d'action avec la première substance, l'effet chimique sur le collodion est assez intense; il est un peu moindre avec le sulfure bleu de calcium; avec le nitrate d'urane, après trois quarts d'heure d'action, l'effet est faible, quoique appréciable. Dans ce cas, l'action chimique suit la réfrangibilité des rayons émis; avec le sulfure de strontium lumineux violet, la lumière émise étant plus réfrangible contient en abondance les rayons qui influencent l'iodure d'argent; la deuxième matière est moins violette, et la troisième, qui renferme peu de rayons bleus, agit moins efficacement. L'on obtient donc des effets chimiques analogues à ceux qui sont produits sous l'influence des rayons solaires.

Il est facile de se rendre compte par quel motif on ne peut mettre en évidence aucune action chimique déterminée à l'aide des rayons émanés d'un corps rendu phosphorescent comme un sulfure alcalino-terreux par une seule exposition à la lumière solaire : cela tient à ce que les rayons émanés des corps lumineux après une simple insolation

ont une intensité beaucoup trop faible, puisqu'il faut une demi-heure d'action continue d'un corps placé dans le phosphoroscope pour avoir un effet chimique bien manifeste; pendant ce temps le corps reçoit au moins six cents fois par seconde l'action solaire, ce qui fait en une demi-heure environ 1,000,000 de fois l'action produite par une simple insolation.

D'après ce que l'on a vu précédemment, la réfrangibilité de la lumière émise par phosphorescence est en général moindre que celle des rayons actifs. Or on sait que dans le rayonnement solaire l'action calorifique est plus grande lorsque la longueur d'onde est plus considérable, de sorte que la chaleur qui est bien manifeste dans la partie la moins réfrangible n'est plus appréciable dans la partie violette du spectre. Il était intéressant de vérifier si, lors de l'action des corps phosphorescents, le rayonnement résultant de l'action subséquente de la partie la plus réfrangible du spectre était capable de produire une impression calorifique, alors que cette partie du spectre n'aurait pu le faire; ou bien, en d'autres termes, la transformation du mouvement vibratoire donnant lieu aux phénomènes de phosphorescence, en augmentant la longueur d'onde des rayons actifs ne donnerait-elle pas de la chaleur, alors que le mouvement vibratoire des rayons incidents pourrait produire d'autres actions. Si cet effet devait avoir lieu, il semble qu'il serait plus sensible avec les substances qui, par phosphorescence, émettent de la lumière rouge ou orangée.

Pour examiner s'il se produisait une action de ce genre, on a disposé une pile thermo-électrique très-sensible en relation avec un multiplicateur, de façon à pouvoir étudier l'action calorifique résultant, soit du contact du corps phosphorescent, soit de son rayonnement par diffusion. Dans le premier cas, on a attaché des fragments très-phosphorescents à la pile thermo-électrique; dans le second, on les a placés à quelques centimètres de distance. En opérant avec les corps phosphorescents rouges-orangés comme avec les matières les plus lumineuses vertes et jaunes, telles que les sulfures de barium ou de strontium, de même qu'avec les matières telles que le sulfate de quinine, la solution de chlorophylle ou l'azotate d'urane, il n'a pas été possible de reconnaître de traces d'action calorifique autre que celle qui résulte de l'influence des rayons solaires actifs eux-mêmes.

Il en a encore été de même en plaçant des corps dans le phosphoroscope et en les éclairant à l'aide des rayons qui avaient traversé un écran rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre ammoniacal, lequel ne laisse

passer que de la lumière bleue foncée et violette. Les faibles effets obtenus n'ont pas permis de faire la part de ce qui appartenait à l'échauffement direct du corps. Il est possible que dans l'un et l'autre cas la sensibilité des piles thermo-électriques et celle du multiplicateur ne soient pas assez grandes ; l'on doit alors attribuer les résultats négatifs à cette cause, car la sensibilité des piles thermo-électriques par rapport aux rayons calorifiques, est loin d'être aussi grande que celle de la rétine pour les rayons lumineux ainsi que celle des corps phosphorescents rendus actifs par insolation.

D'un autre côté, si lors de l'extinction d'un faisceau de rayons d'une réfrangibilité quelconque par un corps inactif, toute l'action transmise au corps était efficace pour produire de la chaleur, il pourrait se faire que lorsqu'une partie du faisceau donne lieu à un phénomène de phosphorescence sur un corps impressionnable, l'action calorifique soit diminuée dans la proportion des rayons efficaces qui concourent à cet effet; dans ce cas on n'aurait trouvé aucune indication thermométrique dans le sens cherché; c'est une question qui reste à éclaircir.

*Transmission de l'effet de phosphorescence au delà des points impressionnés.* Lorsqu'on examine dans l'obscurité une substance phosphorescente, comme un fragment de sulfure de calcium, il semble que des rayons lumineux soient émis du milieu de la masse, et que le phénomène ne réside pas seulement à la surface du corps. L'effet qui se produit est analogue à celui que l'on observe lorsque les corps sont portés à la température rouge, et qu'ils deviennent lumineux par la chaleur; les molécules sont aussi bien en vibration à une certaine profondeur qu'à la surface, et l'on conçoit que des rayons émis par les particules jusqu'à une très-petite distance de la surface puissent être envoyés à l'observateur. Pour les corps phosphorescents il en est de même; les différentes substances avec lesquelles on opère n'ont pas une opacité absolue, surtout sous une petite épaisseur; il résulte de là que la lumière peut pénétrer à une petite profondeur, et rendre phosphorescentes les parties qui se trouvent frappées par elle.

Mon père et M. Biot (1) ont obtenu un effet qui me semble devoir être expliqué par une certaine translucidité des substances phosphorescentes : ils ont reconnu que si l'on excite la phosphorescence avec une étincelle électrique sur une très-petite étendue de la surface

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*, tome VI, page 297.

d'un fragment de sulfure de calcium, le point lumineux, qui devient visible immédiatement après la décharge, augmente peu à peu de dimensions, de sorte que l'action phosphorique semble se propager autour du point frappé. Je pense que sans admettre cette propagation, il est possible que la substance n'étant pas complétement opaque, les rayons ne bornent pas leur action à la partie frappée directement par la lumière; en effet, j'ai vérifié directement, en plaçant des fragments de sulfure de calcium de $\frac{1}{2}$ à 1 millimètre d'épaisseur sur la route d'un faisceau de rayons lumineux très-mince dans l'intérieur d'une chambre obscure, que le fragment était doué d'une certaine translucidité, et que les rayons diffusés qui éclairaient imparfaitement la partie postérieure du fragment suffisaient pour rendre cette partie légèrement phosphorescente. Il est donc probable que lorsqu'une surface de petite étendue est frappée par la lumière, les parties voisines sont influencées par diffusion; et comme la lueur qu'elles émettent est moins vive que celle qui est émise immédiatement par la partie centrale, on aperçoit celle-ci la première, et peu à peu les effets devenant comparables, la tache lumineuse semble s'agrandir. Cette expérience curieuse, qui peut-être n'est due qu'à une illusion d'optique, est facile à répéter avec un faisceau de rayons solaires introduits dans une chambre noire; on les concentre alors au foyer d'une lentille, et après les avoir reçus sur la surface d'un fragment de sulfure de calcium très-phosphorescent, on constate que la partie frappée directement par la lumière, et qui est visible après l'impression lumineuse, augmente d'étendue dans l'obscurité.

Je citerai encore l'expérience suivante, qui se rapporte également à ce sujet : j'ai impressionné une substance phosphorescente fixée sur une lame de verre avec de la gomme, puis je l'ai mise en contact avec une surface semblable plus étendue, mais non impressionnée, et qui avait été placée dans l'obscurité depuis plus d'un jour; au bout d'une heure, en élevant la température de la surface non impressionnée, j'ai obtenu une faible émission de lumière en face des points qui se trouvaient au contact des parties actives; mais comme une feuille de mica très-mince interposée s'est opposée à cette action, j'ai pensé que quelques parties du sulfure phosphorescent avaient pu se détacher et rester adhérentes à l'autre surface en contact. Je n'ai pu reconnaître nettement, par ce mode d'expérimentation, si la propagation de l'action phosphorogénique avait lieu de molécule à molécule par contact, et jusqu'à quelle limite elle pourrait se produire. Ainsi, quant à présent, on ne peut dire si l'action

phosphorescente se trouve limitée très-exactement aux parties frappées par le rayonnement; car cette limite, sans être aussi étendue que mon père et M. Biot le supposaient, pourrait être de l'ordre de grandeur des espaces intermoléculaires.

Quant aux corps phosphorescents dont la persistance de l'impression lumineuse est de peu de durée, tels que le sulfate de quinine, le verre d'urane, quand ils sont bien transparents ils ne paraissent pas présenter de propagation de l'action lumineuse au delà des points frappés par la lumière, ou du moins l'extension des effets produits n'a pas été appréciable aux moyens de mesure.

*Résumé et conclusion du livre VI.*

En résumé, les résultats renfermés dans ce livre montrent que lorsque la lumière vient frapper certains corps, et peut-être la plupart d'entre eux, son action ne cesse pas aussitôt que la lumière ne les éclaire plus; indépendamment des rayons réfléchis et transmis, ces corps émettent, en vertu d'une action qui leur est propre, des rayons lumineux dont la durée, l'intensité et la composition dépendent de leur nature et de leur état physique. Quelques-uns donnent une émission lumineuse de très-courte durée et inférieure à $\frac{1}{5000}$ de seconde; d'autres donnent de la lumière pendant plus de trente-six heures. Peut-être cette action appartient-elle à tous les corps, et ne se manifeste-t-elle qu'à un degré beaucoup plus faible dans ceux que l'on ne peut voir dans le phosphoroscope, ce qui fait que l'on ne peut apprécier l'émission lumineuse que sur un certain nombre d'entre eux.

Les corps en vertu d'une certaine élasticité conservent donc des vibrations, et agissent ensuite comme sources lumineuses. Il est probable que ces actions interviennent dans certains effets de coloration que présentent plusieurs corps.

Il n'y a aucun rapport entre la durée de la lumière émise par les corps impressionnés, l'intensité de cette lumière et sa réfrangibilité : ainsi un corps peut émettre pendant longtemps de la lumière avec une faible intensité (diamant, chlorophane), ou bien pendant un temps très-court une lumière très-vive (spath d'islande, alumine, verre, nitrate d'urane, etc.). On a vu aussi qu'il n'y a aucune relation entre la réfrangibilité de la lumière active et celle de la lumière émise, mais que les rayons émis ont toujours une longueur d'onde supérieure ou au plus égale à celle

des rayons actifs. Ainsi des vibrations lumineuses d'une vitesse déterminée ne peuvent exciter dans les corps que des vibrations de même vitesse ou de vitesse moindre, mais non de vitesse plus grande.

Un même corps préparé de différentes manières peut présenter des effets lumineux variables d'intensité; mais quand la composition de la lumière émise est la même, la loi de l'émission ne change pas et dépend, ainsi que la composition de cette lumière, de la nature seule du corps.

Pour quelques substances, non-seulement la composition chimique, mais encore l'état physique influe tellement sur la composition de la lumière émise que l'on peut préparer à volonté, avec plusieurs d'entre elles, des masses phosphorescentes (phosphores artificiels) qui présentent une quelconque des nuances prismatiques. On pourrait encore, par une comparaison, représenter les effets obtenus en disant que ces derniers corps, par rapport aux effets lumineux sont analogues aux cordes sonores auxquelles on fait rendre différents sons suivant leur état de tension.

L'action temporaire de la chaleur tend à diminuer et même à anéantir l'intensité des effets lumineux émis par les corps en vertu de leur action propre après l'influence du rayonnement; elle modifie également la composition de la lumière émise, et ce changement peut être tel qu'avec une substance comme le sulfure de strontium lumineux bleu à la température ordinaire on peut obtenir toutes les nuances prismatiques comprises entre le violet et l'orangé, et cela entre les limites de température de — 20° à 150°.

La chaleur peut agir également en modifiant les corps solides d'une manière permanente ; dans ce cas, l'action préalable d'une température élevée augmente l'intensité de la lumière émise après l'insolation, mais seulement quand ce corps est revenu à la température ambiante.

L'emploi du phosphoroscope, en ce qui concerne les impressions exercées par la lumière sur certaines substances, permet d'aborder des questions analogues à celles qui règlent le refroidissement et les quantités de chaleur émises ou absorbées par les corps.

Les phénomènes de phosphorescence sous l'action de la lumière peuvent encore être invoqués dans l'étude de plusieurs questions de physique moléculaire, et servir à éclairer différents points d'analyse chimique. On peut citer, comme preuve, l'exemple remarquable des effets différents produits par la chaux provenant du spath d'Islande ou de

l'arragonite, effets qui se retrouvent dans certaines combinaisons obtenues avec ces substances ; quand ces composés ont subi un certain nombre de réactions, ils tendent vers une action uniforme où l'influence première des deux corps cristallisés ne se fait plus sentir. Ainsi la cause qui donne lieu au phénomène de phosphorescence par insolation d'une substance est probablement autre que celle d'où dépend son état cristallin, et tient peut-être à sa densité ou à une propriété physique particulière non encore spécifiée. Enfin, ces phénomènes touchent à l'une des parties les plus délicates de l'optique, c'est-à-dire à l'absorption de la lumière ainsi qu'à la nature même de l'agent lumineux.

# LIVRE VII.

## EFFETS LUMINEUX PRODUITS DANS LES CORPS ORGANISÉS.

## CHAPITRE PREMIER.

### Phosphorescence des végétaux.

§ 1. *Matières végétales; bois lumineux.*

On a déjà vu dans le livre II que les phénomènes lumineux présentés par le bois ainsi que par certaines plantes avaient attiré l'attention générale depuis les temps les plus reculés, et que dans le milieu du seizième siècle Conrad Gesner (voir page 11) avait réuni tout ce que l'on savait sur ce sujet dans un ouvrage intitulé *De raris et mirandis plantis*, etc. Depuis cette époque les recherches qui ont été faites ont conduit aux résultats que nous allons résumer.

Un grand nombre de matières végétales peuvent devenir lumineuses après la cessation de la vie; on rencontre accidentellement des tiges de bois, des fragments de poutre, se trouvant dans des endroits humides et ayant perdu leur force de tissu et qui sont lumineux; des brindilles de bois et des feuilles peuvent présenter les mêmes effets, ainsi que des tubercules (1) et des fruits quand ils commencent à se décomposer (2).

D'après Dessaignes (3), tous les bois, de quelque nature qu'ils soient, peuvent devenir lumineux pourvu qu'ils soient pénétrés d'eau, maintenus à une température de 8 à 12° et en contact avec l'air atmosphé-

(1) *Journal de physique*, t. 36, p. 225, 1790.

(2) Tulasne, *Sur la phosphorescence de l'agaric de l'olivier*, *Annales des sciences naturelles*, 3e série botanique, t. 9, p. 338.

(3) *Journal de physique*, t. 68, et t. 69, p. 26.

rique. Le bois de chêne exposé aux mêmes actions brunit, puis se décolore, avant de devenir lumineux.

Boyle avait déjà remarqué en 1668 (1) que la lueur du bois phosphorescent disparaissait à mesure que l'on faisait le vide dans le récipient de la machine pneumatique où il était placé; en faisant rentrer l'air, le bois reprenait sa faculté lumineuse. Dessaignes a vérifié ce fait et a montré de plus que le bois lumineux s'éteignait dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène, mais qu'il brillait dans l'air et dans l'oxygène; en outre, dans ces deux dernières circonstances, il y avait émission d'acide carbonique. Il est donc probable qu'une sorte de combustion lente est cause de l'émission lumineuse de ces matières végétales.

La présence de l'eau est nécessaire pour que cette action se manifeste; quand on dessèche le bois lumineux il cesse de luire; humecté de nouveau il reprend sa faculté lumineuse.

A une température trop élevée ou trop basse, la lumière cesse de se produire; dans l'eau bouillante le bois perd sa faculté lumineuse. A 50° la phosphorescence n'est que suspendue; à 37° elle ne disparaît pas et paraît même prendre plus d'éclat. Au-dessous de 0°, dans un mélange réfrigérant, la lumière disparaît; à + 6°,5 elle se maintient; quand le bois a été rendu obscur par abaissement de température, en l'échauffant il redevient lumineux.

Ce phénomène, d'après Dessaignes, paraît tenir à un état particulier de décomposition du bois; quand il cesse de se produire, le bois a perdu sa flexibilité, sa force de tissu, sa cohésion et une partie de sa densité. Le ligneux étant intact, du moins en apparence, ce serait une altération du parenchyme qui produirait cet effet. M. Tulasne, dans le mémoire cité plus haut, a observé également que les points brillants de certaines feuilles mortes et de débris de végétaux étaient ceux qu'une altération particulière du parenchyme avait rendus blanchâtres.

On a supposé que la phosphorescence des débris végétaux pouvait être due à celle de plusieurs champignons qui s'y développent. Mais alors la difficulté pour expliquer le phénomène est la même; comment les champignons deviendraient-ils lumineux? Ce serait sans doute par une action chimique lente donnant toujours de l'acide carbonique et exigeant la présence de l'oxygène; seulement, dans ce cas, cette action s'exercerait conjointement avec la vie végétale, comme dans les végétaux dont on

(1) Boyle, *Opera omnia*, t. 3.

va parler, au lieu d'apparaître après leur mort. Mais il est plus probable que l'altération de certaines parties organiques est la cause de l'effet observé, comme cela a lieu aussi pour les animaux. On doit voir par là que l'action chimique lente de l'oxygène sur le phosphore n'est pas la seule réaction chimique accompagnée de lumière, puisque celle dont il vient d'être question ne s'exerce qu'entre ce même gaz et des matières qui ne renferment que de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone.

### § 2. *Phosphorescence des végétaux vivants.*

Si la plupart des débris végétaux peuvent donner une émission de lumière quand ils sont dans un certain état d'altération, il n'y a qu'un petit nombre de plantes qui dans l'état de vie manifestent ce phénomène ; encore ne se produit-il que dans des circonstances déterminées et non pas dans toutes les phases de la vie végétale.

Les phénomènes de lumière n'ont guère été observés jusqu'ici que dans une quinzaine de plantes phanérogames, et avec 8 ou 9 végétaux criptogames. On a prétendu que des fleurs, comme la capucine et le souci, présentent à la tombée du jour, pendant l'été, des phénomènes lumineux de scintillation; mais les effets de ce genre ont été révoqués en doute, et il est probable qu'il faut les attribuer à des illusions d'optique et à ce que au moment de l'observation la diffusion de la lumière sur les fleurs donne à ces dernières un éclat supérieur à celui des corps environnants.

On doit comprendre les champignons parmi les plantes lumineuses comme étant celles qui ont servi aux expériences les plus nettes. On peut citer d'abord les rhizomorphes, puis plusieurs espèces d'agaric, dont quatre sont bien connues; l'agaric de l'olivier (indigène), et qui se trouve dans le midi de la France et dans l'Europe méridionale; l'agaric igné de l'île d'Amboine; l'agaric noctiluque recueilli à Manille par Gaudichaud en 1836; l'agaric de Gardner, ou fleur de coco, du Brésil, et qui naît sur les feuilles mortes du palmier nain. Il est probable que d'autres plantes du même genre présentent des effets semblables à des degrés plus ou moins marqués, et même des auteurs en ont cité plusieurs.

Martius (1) a signalé dans son voyage de Malhada à Bahia au travers

(1) Martius, 2e partie, Munich, 1828, 6e livre, 2e chapitre, p. 594, et 7e livre, ch. 1er, p. 7 2, 726, etc.

du Brésil l'existence de l'euphorbia phosphorea, dont le suc liquide est phosphorescent. Les caisses de ses paquets étant venus à heurter les branches de cette plante, il en sortit un lait blanc qui au même moment était phosphorescent. Il répéta à plusieurs reprises le même effet en brisant les branches de la plante. Le phénomène durait chaque fois pendant plusieurs secondes et la lumière émise était plus forte que celle du bois phosphorescent. La température pendant l'observation du phénomène avait été de 25° centigrades; une heure plus tard, cette température était descendue à 20°, et il n'a plus observé aucun phénomène de lumière. Il a encore trouvé fréquemment la plante jusqu'au rio de San-Francisco, formant des fourrés épais et impénétrables, mais il n'a pu voir de nouveau se renouveler ce phénomène.

Martius parle aussi d'un phénomène de phosphorescence qui aurait été observé par Mornay sur une autre plante brésilienne lactescente, et il croit que cette plante pourrait être une apocynée; mais il n'en n'a pas été témoin.

Les recherches les plus complètes sur la phosphorescence des végétaux ont été faites avec l'agaric de l'olivier; parmi les auteurs qui ont observé les effets que présente ce végétal, on peut citer MM. de Candolle, Delille (1), Friës, et dans ces dernières années, MM. Tulasne (2) et Fabre (3).

En général la phosphorescence se manifeste dans les mois d'octobre et de novembre, sur la face inférieure lamellée ou l'hymen de ces champignons, et elle ne dépasse pas les feuillets; cependant M. Tulasne a vu toute la masse du champignon lumineuse, et il n'y a que la face supérieure ou cuticule qui ne le soit jamais; il y a des différences quant à l'intensité des effets produits sur les divers sujets sans que la cause en soit connue.

La chaleur et la dessiccation peuvent influer sur la production de la lumière de ces champignons comme sur les bois lumineux; quand ils sont desséchés ils cessent de luire. Un abaissement de température tel que la température extérieure soit à 4° suffit pour faire cesser le phénomène; le maximum, d'après M. Fabre, a lieu quand la température extérieure est de 8 à 10°; au delà de 50°, dans l'eau chaude, la phosphorescence est détruite.

(1) *Nouv. exam. de la phosphorescence de l'agaric de l'olivier.*
(2) *Ann. des sciences naturelles,* 3e série, partie botanique, t. 9, p. 338, 1848.
(3) *Ibid.*, 4e série, partie botanique, t. 4, p. 179, 1855.

La production de la lumière exige la présence de l'oxygène ; dans les gaz azote, hydrogène, et acide carbonique toute lueur cesse ; dans l'eau aérée la lumière continue à se montrer, mais dans l'eau privée d'air elle cesse de se produire. La lumière se manifeste tout aussi bien le jour que la nuit; seulement, il faut que l'œil s'habitue à l'obscurité et que l'observateur soit placé préalablement dans une chambre noire pour observer le phénomène, sans quoi il ne pourrait saisir la lueur qu'émettraient les champignons. M. Fabre, qui a observé ce fait, a constaté que les champignons lumineux émettent plus d'acide carbonique que ceux qui ne le sont pas.

Il résulte de ces différentes recherches que la production de la lumière est une manifestation de la vie végétale; dans ce cas, comme après la mort, il se produit une réaction chimique, une combustion lente, qui n'est accompagnée de lumière que dans des conditions déterminées, et qui donne aux végétaux la propriété d'être lumineux dans l'obscurité. Indépendamment de ces effets, il est possible que les autres champignons, comme le bois et les matières végétales, puissent donner de la lumière quand leur constitution chimique vient à s'altérer.

Cette réaction chimique très-lente ne saurait, on le conçoit, donner une élévation de température appréciable; aussi les observateurs qui ont cherché à constater l'émission de la chaleur pendant la phosphorescence des végétaux n'ont obtenu aucun résultat appréciable.

# CHAPITRE II.

## Phosphorescence des animaux.

### § 1. *Phosphorescence des matières animales.*

Les matières animales après la mort peuvent devenir bien plus aisément phosphorescentes que les matières végétales. Presque tous les poissons marins ainsi que les mollusques sont dans ce cas, pourvu que la température extérieure soit de 8 ou 10° et qu'ils soient simultanément exposés à l'influence de l'humidité et de l'oxygène de l'air.

Ainsi au printemps ou pendant l'été, il suffit de suspendre des poissons comme les harengs, les merlans, dans un endroit frais, et au bout de peu de jours ils commencent à devenir lumineux dans l'obscurité. Leur surface se revêt d'une matière lumineuse que l'on enlève facilement ; la lumière diminue à mesure que le poisson se putréfie, et finit par s'éteindre tout à fait. La phosphorescence se manifeste donc, comme dans le bois, lorsque ces substances se trouvent dans un certain état de décomposition qui précède la putréfaction ; quand celle-ci a lieu, toute lumière cesse.

Les poissons d'eau douce deviennent également lumineux, mais moins facilement que les poissons et les mollusques marins ; il faut les placer dans des dissolutions salines comme on le dira plus loin. La chair de quelques quadrupèdes peut présenter des effets analogues, mais plus rarement. On a même vu, dans des maladies, la figure et les parties du corps des malades (1), ainsi que les urines, présenter une émission lumineuse dans l'obscurité.

Hulme et Dessaignes, dans les mémoires cités livre I, page 10, se sont occupés des différentes conditions physiques nécessaires pour rendre phosphorescentes les matières organiques d'origine animale.

D'après les expériences de Hulme, pour hâter l'apparition de la lumière avec les poissons marins, on prend environ 12 gr. de chair de hareng que l'on met dans une solution de 6 gr. de sulfate de magnésie et de 48 gr. d'eau (ou 8 parties d'eau, 2 de chair de poisson et 1 de sulfate de magnésie). On place le tout dans un bocal et on l'abandonne aux actions spontanées en présence de l'air, à 8 ou 10° de température. Le second jour, on voit distinctement un anneau luisant sur la surface du liquide, tandis que la partie inférieure reste obscure. En agitant le bocal, toute la masse devient lumineuse et reste dans cet état. Le 3e jour, la lumière se rassemble de nouveau à la surface, mais l'anneau lumineux paraît moins vif. En agitant le flacon la masse entière redevient lumineuse. Avec une solution de sel marin on obtient les mêmes effets.

La laite du hareng, du maquereau, produit aussi la phosphorescence, et même cette propriété y est plus développée qu'avec la chair de ces animaux. Cette lumière atteint son maximum d'intensité vers la troisième ou quatrième nuit.

Hulme a fait également des observations très-curieuses avec les dissolutions salines tenant en suspension les matières organiques désagrégées

(1) Voir Pariset, éloge de Percy.

qui sont phosphorescentes. Il a trouvé que l'eau de chaux, l'eau chargée d'acide carbonique ou d'hydrogène sulfuré détruisait l'effet lumineux. Au contraire les dissolutions de carbonate de soude, de tartrate de potasse, de phosphate de soude, d'azotate de potasse, de miel, de sucre, deviennent lumineuses quand on les mélange avec la matière enlevée sur la surface d'un poisson préparé avec la solution de sulfate de magnésie.

Si l'on ajoute à la solution saline de sulfate de magnésie, devenue lumineuse par la désagrégation du poisson, une proportion plus grande de sel que $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$, aussitôt le liquide redevient obscur. Mais en étendant d'eau la solution, la phosphorescence reparaît. En ajoutant de nouveau du sulfate de magnésie, on fait cesser l'émission lumineuse, qui reparaît en ajoutant encore de l'eau au liquide. Hulme a pu, dans une expérience, éteindre dix fois une solution et la ranimer un même nombre de fois. J'ai répété ces dernières expériences, qui se font très-aisément.

La dessiccation fait disparaître la lumière de ces matières comme cela a lieu avec les débris végétaux. Un abaissement de température produit le même effet, et le retour à la température ordinaire rétablit l'émission lumineuse. La phosphorescence des poissons lumineux disparaît par une élévation de température de 50°, mais elle peut reparaître en abaissant la température ; à 100° elle est détruite.

Les poissons lumineux s'éteignent dans le vide, dans les gaz acide carbonique, azote, hydrogène, etc. ; dans l'air ou dans l'oxygène ils se raniment ; dans l'eau pure soustraite à l'action de l'air ils cessent de briller. Dessaignes a vu que dans un milieu privé d'oxygène et contenant des matière animales phosphorescentes, lorsqu'on introduit de l'air par bulles, à chaque bulle la phosphorescence renaît pendant plusieurs minutes puis disparaît pour se renouveler lors d'une nouvelle introduction d'air.

Ces effets ne peuvent s'expliquer qu'en admettant, pour les animaux comme pour les végétaux, une sorte de décomposition en vertu de laquelle l'oxygène brûle la matière organique et donne lieu à une combustion lente ; cette combustion lente serait donc la cause de la lumière émise. Mais se forme-t-il une matière qui est toujours la même avec toutes les matières animales? ou bien la décomposition s'opère-t-elle en donnant différents produits, mais en présentant toujours une émission lumineuse? C'est ce qui n'a pas encore été établi.

§ 2. *Phosphorescence des animaux vivants.*

Le nombre des animaux vivants phosphorescents est très-considérable, et on est loin de les connaître tous; les animaux marins surtout l'emportent beaucoup par le nombre des espèces qui présentent ces phénomènes. On doit citer d'abord des infusoires en très-grand nombre et qui sont une des principales causes de la phosphorescence de la mer, dont il va être question plus loin. Beaucoup de zoophytes présentent des effets du même genre (1), et surtout quand on vient à les agiter ou à frapper les algues où ils se trouvent.

Ensuite viennent des méduses, des astéries, des mollusques, des néréides, des crustacés et même des poissons. A Gênes, Viviani a trouvé quatorze espèces d'animaux lumineux, et MM. de Quatrefages et Beneden en ont signalé une soixantaine.

D'après Spallanzani, l'aurélie phosphorique possède la faculté lumineuse dans ses grands bras ou tentacules; le reste de l'animal ne brille pas mais se trouve éclairé. La phosphorescence serait due alors à un liquide visqueux qui suinte à la surface des organes.

Les animaux terrestres lumineux sont en moins grand nombre, et appartiennent presque tous à la classe des insectes; cependant, on compte parmi eux un certain nombre d'espèces, surtout dans les régions tropicales. On peut citer, parmi ces animaux, les lampyres, dont quatre espèces se trouvent dans nos climats (2); le lampyre noctiluque; le lampyre luisant, ou ver luisant; le lampyre d'Italie et le lampyre hémiptère. D'autres espèces sont étrangères à notre pays. Le lampyre, ou ver luisant, que l'on trouve communément dans nos climats a sa femelle sans ailes et le mâle ailé; la femelle seule est lumineuse et la lumière se manifeste sous le ventre dans les trois derniers anneaux. Le lampyre d'Italie a les deux sexes ailés et tous deux sont phosphorescents; on l'appelle aussi fulgore ou mouche porte-lanterne.

La famille des élatères renferme plusieurs espèces du genre pyrophore qui vivent dans les régions tropicales de l'Amérique, et qui sont lumineuses. On peut citer notamment les cucuyos (3), chez lesquels cette

(1) *Edimb. New. phil. jour.*, janv, 1842. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. 40, p. 179.

(2) *Dictionnaire des sciences naturelles*, t. 25, article *Lampyre*; 1822.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 59, p. 509.

propriété est très-développée et qui présente l'émission de lumière en deux points au-dessus de la tête ainsi qu'au-dessous du thorax. Il est probable même que la matière lumineuse est répandue dans différentes parties du corps. Cet insecte est un de ceux où le phénomène de phosphorescence est le plus brillant. On prétend qu'au Mexique les dames s'en servent comme d'un objet d'ornement; elles conservent ces coléoptères, les nourrissent et les placent dans leur parure.

On peut citer encore comme étant phosphorescents la scolopendre électrique et le lombric, ou ver de terre. Ce dernier est principalement lumineux pendant l'été et dans des circonstances qui n'ont pas encore été bien définies (1).

Quoique les lampyres ne soient pas les animaux qui donnent la phosphorescence la plus vive, ce sont ceux qui ont été étudiés avec le plus de soin.

Le lampyre, ou ver luisant, femelle commence à être visible entre sept et huit heures du soir dans les mois chauds de l'année, et assez ordinairement au coucher du soleil; la lumière est produite au moyen d'un appareil qui existe dans l'abdomen. On aperçoit effectivement sur la surface intérieure des trois derniers anneaux une matière jaune blanchâtre, demi-transparente, qui vue au microscope présente une organisation de fibrilles composées de nombreuses ramifications, et qui émet une vive phosphorescence. On a remarqué que la volonté de l'animal influe singulièrement sur le phénomène, puisque le bruit ou le mouvement suffit pour le déterminer à affaiblir sa faculté lumineuse.

Les lampyres, suivant Macaire (2), auquel sont dues les expériences dont les résultats sont indiqués ici, conservés dans une boîte ne deviennent pas phosphorescents lorsqu'on ouvre la boîte pendant la nuit. On ne peut pas en conclure que l'action de la lumière soit nécessaire pour donner lieu à ce phénomène, car l'animal étant gêné dans ses habitudes, sa volonté peut dominer la faculté lumineuse, et il peut se faire qu'il reste alors obscur.

Si l'on échauffe un lampyre vivant et obscur dans de l'eau dont on élève graduellement la température, à la première sensation de chaleur l'animal s'agite beaucoup; à 27° la lumière commence à paraître, et à 41° son éclat est des plus vifs. Bientôt après l'animal meurt, sans que pour cela la phosphorescence disparaisse, car elle continue jusqu'à 57°.

(1) *Dictionnaire de physique*, t. 16, p. 311, 1780.
(2) *Bibliothèque univ. de Genève*, 1821.

Si le lampyre est projeté dans de l'eau à 45 ou 50°, il meurt de suite et acquiert une vive phosphorescence. Il en est encore de même avec les lampyres morts, mais non desséchés, pourvu toutefois qu'ils n'aient pas été exposés à une température de 55 à 60°. Si le lampyre mort est projeté dans de l'eau bouillante il émet une lumière assez vive qui cesse ensuite.

La phosphorescence des lampyres diminue par le froid et cesse quand la température est suffisamment basse. Si l'on expose l'animal à l'action de la chaleur, il reprend sa faculté lumineuse.

Dans le vide, l'animal paraît mort pendant quelque temps. Si on le chauffe alors jusqu'à 50°, la lumière ne paraît pas, tandis que s'il est chauffé préalablement dans un tube plein d'air, il jette une vive lumière. Aussitôt que l'on rend l'air, le corps de l'animal reprend ses dimensions et une vive lumière se manifeste.

Dans le gaz oxygène il y a aussi émission d'une vive lumière qui jette plus d'éclat que celle que l'on obtient dans l'air au moment où on élève la température. Le gaz oxyde de carbone produit à peu près les mêmes effets. Dans l'hydrogène, un lampyre luisant y meurt bientôt, et la lumière ne paraît plus même en appliquant l'action de la chaleur; on obtient un effet analogue dans les gaz acide carbonique, sulfureux, et hydrogène sulfuré.

L'animal vivant et obscur étant placé dans un circuit voltaïque y devient légèrement lumineux ; on augmente encore l'effet en l'humectant d'eau pour rendre son corps meilleur conducteur. Si l'on enlève la tête de l'animal et que l'on introduise l'un des fils conducteurs de la pile jusqu'auprès des trois anneaux lumineux et l'autre dans une partie telle que le courant traverse le corps, la phosphorescence se manifeste de la manière la plus vive, surtout lorsque le courant traverse la partie inférieure de l'abdomen où se trouve l'organe lumineux; dans le vide il n'y a aucun effet.

La matière seule soumise à l'expérience augmente d'éclat jusqu'à environ 41°, après quoi elle diminue, devient rougeâtre et cesse tout à fait de luire à 52°. Elle se comporte en général dans les gaz comme le lampyre.

M. Matteucci (1) s'est occupé de la lumière émise par le lampyre d'Italie, soit quand cet insecte est vivant, soit quand la matière lumineuse est extraite de son corps. Dans ce lampyre, les deux derniers

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 71 (1843).

segments du corps qui sont lumineux dans l'obscurité sont jaunâtres pendant le jour. Lorsqu'on tient l'insecte retourné, il luit par intermittences, mais la matière jaunâtre séparée du corps continue à luire pendant plus ou moins longtemps.

M. Matteucci a confirmé les observations de Macaire en ce qui concerne l'action de la chaleur sur ces effets de phosphorescence; il a vu que les lampyres placés dans de l'eau chaude donnaient une émission lumineuse dont la vivacité augmentait jusqu'à 37 à 38°, et qu'à 50° toute phosphorescence était détruite. Un abaissement de température produisait un effet semblable, car à 0° la phosphorescence était bien diminuée et à — 6° elle disparaissait.

Il a vu également que les lampyres cessent de luire dans l'acide carbonique, reprennent leur phosphorescence dans l'oxygène, et que placés dans l'oxygène ou dans l'air, l'émission lumineuse est accompagnée de la formation d'une certaine quantité d'acide carbonique. La matière lumineuse extraite des insectes se comporte de même.

M. Carus (1), qui a fait également des recherches avec la matière lumineuse extraite du lampyre d'Italie, a vu que cette matière étant desséchée perd toute sa phosphorescence, et la reprend quand elle est humectée.

Ces recherches montrent donc que l'oxygène est nécessaire à la production de la lumière, et il est probable que la phosphorescence dans les animaux vivants, comme avec les matières organiques animales et végétales, est le résultat d'une action chimique que domine la volonté de l'animal, puisqu'il a la faculté de la diminuer insensiblement jusqu'au point de la faire disparaître tout à fait. Mais est-ce une matière particulière? par quel organe est-elle sécrétée? C'est ce qui n'a pas été démontré jusqu'ici. On sait seulement que ces phénomènes lumineux se produisent en général à l'époque de l'accouplement des animaux.

L'analyse optique de la lumière émise par les animaux et par les végétaux phosphorescents n'a conduit à aucun résultat, car les images prismatiques sont continues et dénuées de raies brillantes ou obscures (2). On a vu dans le livre précédent, page 340 et suiv., que lors de la phosphorescence des corps solides placés dans le phosphoroscope on pouvait obtenir des raies obscures ou des bandes brillantes, et que par conséquent les

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. 59, p. 607, 1864.

(2) Voir *Traité d'optique d'Herschell*, traduction de Quételet, t. 2, p. 455 (1833). *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 59, p. 509.

phénomènes de phosphorescence présentaient d'autres effets que les phénomènes d'ignition, puisque dans ce dernier cas les solides et les liquides offrent des spectres continus et que les gaz incandescents donnent des raies lumineuses. Mais il se trouve que les matières organiques lumineuses qui ont été examinées jusqu'ici n'ont offert aucune particularité dans ce sens.

### § 3. *Phosphorescence de la mer.*

La phosphorescence de la mer, comme la plupart des phénomènes météorologiques, a dû être observée de toute antiquité. Dans certaines contrées, la lumière qu'elle donne quelquefois est tellement brillante que les personnes qui prennent le moins d'intérêt aux phénomènes naturels sont frappées de l'effet qu'elle produit.

Dans toutes les régions océaniques, mais particulièrement sous la zone tropicale, dès la chute du jour on voit jaillir du sein des eaux une lumière phosphorique plus ou moins vive, due en général à des animalcules qui s'y trouvent contenus. Des matières organiques tenues en suspension dans les eaux, et analogues à la mucosité qui suinte des poissons de mer, pourraient peut-être quelquefois donner lieu au même phénomène; cependant, la première cause est celle qui est la plus générale.

La lumière se montre quelquefois aux crêtes des vagues et partout où l'eau de la mer est agitée. L'effet peut être tel qu'un vaisseau laisse au loin, derrière lui, une traînée lumineuse qui s'efface lentement. MM. Becquerel et Breschet (1) dans un voyage à Venise observèrent ce phénomène à l'embouchure de la Brenta, et constatèrent cette influence de l'ébranlement pour exciter vivement l'émission lumineuse. Cette lueur dirige même les pêcheurs et leur indique les poissons rassemblés qui en sautant font jaillir la lumière.

Il existe dans la mer une foule d'infusoires et d'animalcules qui jouissent de la phosphorescence; suivant leur nature et leur activité, le phénomène est plus ou moins brillant. Quand les animaux sont très-nombreux, leur phosphorescence peut être telle que les eaux sont tout à fait blanches; on indique cet effet par le nom de mer de lait ou mer de neige.

MM. Quoy et Gaimard (2) rapportent à propos de ce phénomène les

(1) Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 vol., t. 4, p. 75.
(2) *Ann. des sciences naturelles*, t. 4, p. 12.

observations suivantes : étant mouillés dans la petite île de Rawak, placée sous l'équateur, ils virent un soir, sur l'eau, des lignes d'une blancheur éclatante; en les traversant avec leur canot, ils voulurent en enlever une partie, mais ils ne trouvèrent qu'un fluide dont la lueur disparut entre les doigts. Peu de temps après, pendant la nuit, et la mer étant calme, ils virent près du vaisseau beaucoup de zones semblables, blanches et fixes; les ayant examinées avec soin, ils reconnurent qu'elles étaient produites par des zoophytes d'une petitesse extrême, et qui renfermaient en eux un principe de phosphorescence si subtil, qu'en nageant avec vitesse et en zigzag, ils laissaient sur la mer les traînées lumineuses dont on vient de parler. Ils mirent le fait hors de doute en plaçant dans un bocal rempli d'eau deux de ces animalcules qui rendirent immédiatement toute l'eau lumineuse. Ils ont constaté en outre que la chaleur est une des causes déterminantes de la faculté lumineuse de ces animalcules.

M. Ehrenberg (1), qui a étudié la lumière émise par les infusoires et les annélides lesquels dans certaines contrées rendent la mer lumineuse, a vu qu'au microscope, la lueur diffuse qui les entoure, n'est autre que la réunion d'une multitude de petites étincelles qui partent de tous les points de leur corps et particulièrement du corps des annélides. Ces étincelles se succédaient avec une telle rapidité et avaient une telle ressemblance avec celles que l'on observe dans les décharges électriques que M. Ehrenberg a établi un rapprochement entre ces deux ordres de phénomènes. Il pense que la lumière émise n'est pas due à une sécrétion particulière, mais à un acte spontané de l'animal, et qu'elle se manifeste aussi souvent qu'on l'irrite par des moyens mécaniques ou chimiques, c'est-à-dire en agitant l'eau ou en versant quelques gouttes d'un acide; une fois les animaux ayant donné de la lumière, en les laissant reposer pendant un certain temps, ils recommencent à produire les mêmes effets. Lorsqu'on fait usage d'un acide trop concentré les animalcules périssent rapidement.

Le noctiluque miliaire est un des infusoires qui contribuent le plus à la phosphorescence de la mer sur nos côtes et probablement sur les côtes du nord. Ce sont des petits animalcules de forme globulaire ayant $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{5}$ de millim. de diamètre; en les supposant pressés les uns contre les autres, il pourrait donc s'en trouver de 25 à 30 mille dans un

(1) Voir Becquerel, *Traité de physique*, t. 2.

centimètre cube. M. de Quatrefages (1) a étudié la lumière émise par cet infusoire et a vu, comme Ehrenberg, en observant la lumière au microscope, que cette lumière est due à une multitude de petits points lumineux isolés, présentant l'apparence d'étincelles. Quelques auteurs ont pensé que les points lumineux pourraient être des germes, et rattacheraient l'émission de la lumière au phénomène de génération.

M. de Quatrefages a reconnu que tous les agents physiques ou chimiques qui excitent la contraction des noctiluques produisent en même temps un redoublement de phosphorescence. Il a conclu de ses observations, que chez les noctiluques la phosphorescence semble se rattacher à la contraction spontanée, et n'est pas un phénomène de combustion comme chez les lampyres.

MM. Charles Robin et Legros ont vérifié ce fait que, lors de la phosphorescence des noctiluques, le plus léger ébranlement donne lieu dans tout le corps de l'animalcule, et non pas dans une région plutôt que dans une autre, à chaque contraction qu'il fait, la propriété de devenir lumineux. Ayant fait passer des courants électriques donnés par un appareil d'induction dans de l'eau contenant des noctiluques, ils ont vu que ce passage produisait une excitation temporaire, donnant lieu chaque fois à une vive émission lumineuse, qui cessait peu à peu quand le passage de l'électricité était interrompu.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 31, p. 428 et 618.

FIN DU TOME PREMIER.

# ADDITIONS ET ERRATA.

1° *Note relative à la source lumineuse prise pour unité dans la comparaison des pouvoirs éclairants des becs de gaz.*

Pages 98 et 121, on a dit que la source lumineuse prise pour unité dans la comparaison des pouvoirs éclairants des différentes flammes, était le bec Carcel toujours monté de la même manière, de façon à brûler 42 gr. d'huile de colza épurée par heure. On a dit également, page 120, que la lumière du gaz est fort variable, et que l'on ne peut indiquer des résultats que relativement à une composition déterminée du gaz, ainsi qu'à la forme du bec dans lequel il brûle, à sa température, à sa pression lors de sa sortie, et à la vitesse du courant d'air.

MM. Dumas et Regnault, ayant été chargés d'une étude sur le pouvoir éclairant du gaz d'éclairage dans la ville de Paris, ont fait installer un appareil de vérification permettant de déterminer les consommations d'huile et de gaz effectuées pendant un temps donné par une lampe et par un bec de gaz, brûlant autant que possible dans les mêmes conditions, et donnant la même quantité de lumière. Ces expériences ont été suivies par MM. Audouin et Bérard (1).

Ces recherches ont montré quelle était l'influence de conditions diverses dans la grandeur et la hauteur de la mèche, la position du verre, etc., sur la dépense et le pouvoir éclairant de l'huile, puis ensuite comment la combustion du gaz s'opérait dans les différents becs généralement en usage. Les expériences se rapportent au gaz d'éclairage fourni par la distillation de la houille; avec le gaz provenant d'autres matières bitumineuses, les résultats pourraient être différents.

En employant les becs à une ouverture, dits becs bougies, comme avec les becs à fente ou bec papillons, la consommation du gaz est plus

(1) *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 65, p. 424.

grande que cela est nécessaire pour une même quantité de lumière; d'un autre côté, une même quantité de gaz peut donner des quantités différentes de lumière suivant les dimensions de l'ouverture, et en général le pouvoir éclairant augmente quand, toutes conditions étant les mêmes, la pression du gaz diminue.

Les becs à double courant d'air, c'est-à-dire construits d'après le principe du bec d'Argant, et composés d'une couronne circulaire percée soit d'une fente continue, soit de trous dont le nombre varie, donnent en général une meilleure utilisation de la matière brûlée. Le pouvoir éclairant de ces becs peut également varier suivant le diamètre des trous, leur nombre, la distribution de l'air servant à la combustion et la hauteur du verre. Néanmoins, lorsque la combustion s'opère avec des becs en porcelaine, et que la pression du gaz à la sortie est faible, l'intensité lumineuse est la plus forte.

L'intensité lumineuse de la flamme du gaz est due à l'irradiation des particules de carbone incandescentes qui proviennent d'une décomposition du gaz et qui sont destinées à être brûlées ultérieurement. Si la combustion a lieu incomplétement, les particules de charbon qui échappent à la combustion se répandent en fumée dans l'atmosphère; si la combustion a lieu trop complétement, le pouvoir éclairant de la flamme peut être diminué ou même à peu près détruit, comme on l'observe en mélangeant le gaz avec une proportion déterminée d'air atmosphérique. Les expériences ont montré que l'introduction dans le gaz d'éclairage ordinaire de 6 p. 100 d'air suffit pour diminuer de moitié son pouvoir éclairant. Un mélange de 20 pour 100 ou de $\frac{1}{5}$ du volume ne donne plus de lumière. Ainsi le mélange d'une faible quantité d'air au gaz est désavantageux à son pouvoir éclairant.

D'après ces recherches, l'instruction relative à la comparaison de la flamme du gaz d'éclairage porte que dans l'appareil de M^rs^ Dumas et Regnault, la flamme de la lampe Carcel prise pour type, et celle du bec de gaz normal étant amenées, au moyen du photomètre, fig. 6, p. 101, à donner la même quantité de lumière, quand la lampe Carcel a brûlé 10 grammes d'huile, le bec doit avoir brûlé 25 litres de gaz s'échappant sous une pression de 2 à 3 millimètres d'eau.

La lampe Carcel doit avoir un bec dont les dimensions sont déterminées, et dont le diamètre extérieur est de 23 millim. 50; elle doit être remplie d'huile de colza épurée, et être amenée à brûler 42 gr. d'huile à l'heure.

Le bec de gaz normal est un bec en porcelaine à double courant d'air et dit bec Bengel. Il a 30 trous dans la couronne, le diamètre de chaque trou étant de $0^{mm},6$; le diamètre extérieur de la couronne est de $22^{mm},5$, le diamètre entre les trous de $16^{mm},5$ et le diamètre intérieur de l'ouverture du courant d'air de 9 millimètres.

---

2° *Note relative à l'incandescence des corps solides colorés.*

On a dit, page 104, que l'image prismatique des corps solides incandescents était continue, et que sous ce rapport, d'après les observations de MM. Bahr et Bunsen, l'erbine faisait exception.

J'ai pu vérifier ce résultat, et observer les bandes lumineuses que présente cette terre, lorsque étant placée à l'extrémité d'un fil de platine elle se trouve portée à la température rouge dans la flamme du gaz mélangé d'air.

Les substances qui se colorent par élévation de température et qui restent colorées près de la température rouge, indiquent une disposition moléculaire d'après laquelle certains rayons lumineux sont réfléchis en plus grande proportion et d'autres sont absorbés. Tel est l'oxyde de zinc, non éclairante qui devient jaune par élévation de température ; placé dans la flamme d'un bec de gaz, bien qu'il soit volatil, si l'on examine le spectre qu'il donne par incandescence, on trouve que ce spectre contient la partie la moins réfrangible et très-peu de rayons bleus; ce corps se comporte donc par irradiation comme lorsqu'il est vu par diffusion à la lumière du jour, c'est-à-dire qu'il absorbe les rayons les plus réfrangibles.

En est-il de même avec l'erbine ? Cela est assez difficile à dire, car précisément les bandes lumineuses sont à la même place que les bandes noires d'absorption obtenues par le passage de la lumière au travers de la dissolution d'un sel d'erbium. Rien ne s'oppose cependant à ce que les corps lumineux par incandescence présentent, près de leur surface, des effets d'absorption, puisque l'on a vu, page 340 et suiv., que les corps phosphorescents, sous l'influence de la lumière, peuvent

donner des images spectrales avec des bandes lumineuses et des raies noires.

---

Page 160. La planche fig. 18, placée à côté du texte, et qui renferme les images spectrales relatives aux principaux métaux, ne porte pas de numéro.

---

# TABLE DES MATIÈRES.

## PREMIÈRE PARTIE.

### SOURCES DE LUMIÈRE.

Pages.

### PRÉLIMINAIRES.

SOURCES LUMINEUSES DIVERSES, SOURCES CÉLESTES OU MÉTÉORIQUES.. 1

### LIVRE PREMIER.

NOTICE HISTORIQUE DES RECHERCHES FAITES SUR LA PHOSPHORESCENCE JUSQU'EN 1840.

CHAP. Ier. *État des connaissances sur la phosphorescence jusqu'au commencement du dix-septième siècle.*
§ 1. Phosphorescence des corps organisés..... 9
§ 2. Minéraux supposés lumineux. escarboucle, anthrax, pyrope..... 11
CHAP. II. *Découvertes faites dans le dix-septième siècle.*
§ 1. Pierre de Bologne. Diamant lumineux..... 16
§ 2. Phosphore..... 19
CHAP. III. *Recherches entreprises depuis le commencement du dix-huitième siècle jusqu'en* 1840.
§ 1. Phosphorescence par les actions mécaniques..... 20
§ 2. Phosphorescence par l'action de la chaleur..... 22
§ 3. Phosphorescence par l'action de la lumière..... 25

### LIVRE II.

EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR LES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

CHAP. Ier. *Effets lumineux produits par le frottement et par la percussion*.... 35
CHAP. II. *Effets lumineux produits par le clivage et par la cristallisation.*
§ 1. Clivage..... 38
§ 2. Cristallisation..... 39

## LIVRE III.

### EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR LA CHALEUR.

Pages.

CHAP. Ier. *Phosphorescence par l'action de la chaleur.*

§ 1. Phénomènes généraux. Substances impressionnables diverses..... 43

§ 2. Influence de la lumière sur le pouvoir de phosphorescence par la chaleur. Action temporaire ; action permanente..... 51

§ 3. Combustion lente. Phosphore..... 57

§ 4. Incandescence phosphorique..... 59

CHAP. II. *Incandescence, irradiation.*

§ 1. Effets généraux ; pyromètre employé dans l'étude de l'irradiation..... 61

§ 2. Température à laquelle tous les corps deviennent lumineux. Intensité des rayons émis ; photomètre destiné à son évaluation..... 70

§ 3. Intensité des rayons différemment réfrangibles émis par les corps incandescents. Intensité totale de la lumière émise..... 86

§ 4. Comparaison des pouvoirs éclairants des différentes sources de lumière. Unité lumineuse. Photomètres divers..... 97

§ 5. Lumière émise par les solides, les liquides et les gaz. Pouvoir éclairant des flammes ; bougies, lampes, gaz d'éclairage, chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, lampe au magnésium, arc voltaïque..... 104

§ 6. Intensité de la lumière émise par les corps incandescents placés dans diverses sources calorifiques ; évaluation approchée de leur température. 122

## LIVRE IV.

### ANALYSE DE LA LUMIÈRE PAR RÉFRACTION.

CHAP. Ier. *Sources lumineuses d'origine céleste ou météorique.*

§ 1. Spectre coloré ; raies du spectre solaire et des spectres stellaires..... 129

§ 2. Spectre ultra-violet..... 138

§ 3. Spectre infra-rouge..... 141

§ 4. Longueur d'onde des rayons de diverse réfrangibilité..... 145

CHAP. II. *Sources lumineuses par incandescence.*

§ 1. Appareils destinés à l'étude spectrale ou spectroscopes..... 149

§ 2. Analyse par réfraction de la lumière des flammes. Raies brillantes. Raies caractéristiques des différents corps..... 154

§ 3. Causes des raies du spectre solaire ..... 162

## LIVRE V.

### EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR L'ÉLECTRICITÉ.

Pages.

CHAP. Ier. *Étincelles électriques.*
§ 1. Lueurs et étincelles. Influence de la nature des gaz et des conducteurs... 167
§ 2. Photomètre fondé sur l'emploi de la lumière électrique..... 173
CHAP. II. *Lumière électrique dans les gaz raréfiés ou échauffés.*
§ 1. Lumière électrique dans les gaz raréfiés..... 174
§ 2. Arc voltaïque..... 179
CHAP. III. *Composition de la lumière électrique.*
§ 1. Lueurs et étincelles électriques..... 182
§ 2. Arc voltaïque..... 188
CHAP. IV. *Persistance lumineuse des gaz après le passage des décharges électriques*..... 192
CHAP. V. *Météores lumineux d'origine électrique.*
§ 1. Lueurs électriques de l'atmosphère; éclairs..... 197
§ 2. Aurore polaire..... 199

## LIVRE VI.

### EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR L'ACTION DE LA LUMIÈRE.

CHAP. Ier. *Substances dont la phosphorescence est de longue durée. Phosphores artificiels.*
§ 1. Substances phosphorescentes diverses..... 207
§ 2. Sulfures phosphorescents. Couleur de la lumière émise à la température ordinaire..... 214
Sulfures de calcium..... 216
Sulfures de strontium..... 231
Sulfures de barium..... 236
Sulfure de zinc..... 240
CHAP. II. *Durée et intensité de la lumière émise.*
§ 1. Durée de la lumière émise par les différents corps phosphorescents à longue persistance..... 244
§ 2. Durée de la persistance des impressions lumineuses sur les corps. Phosphoroscope..... 247
§ 3. Substances impressionnables diverses visibles dans le phosphoroscope.... 256
§ 4. Intensité maximum de la lumière émise par un corps pour une intensité lumineuse incidente déterminée..... 260

Pages.

§ 5. Vitesse de déperdition de la lumière émise par un corps phosphorescent, quand l'émission est de très-courte durée. Pouvoir émissif et capacité des différents corps pour la lumière..... 273

§ 6. Vitesse de déperdition de la lumière quand l'émission lumineuse du corps est de longue durée. Effets présentés par les phosphores artificiels..... 285

Chap. III. *Réfrangibilité des rayons actifs ; spectres phosphorogéniques. Action de la lumière électrique et des lumières artificielles.*

§ 1. Action des rayons de diverse réfrangibilité sur les substances phosphorescentes à la température ordinaire..... 298

§ 2. Phosphorescence de courte durée; effets présentés par les corps organiques comme le bisulfate de quinine, l'esculine, la chlorophylle, etc., exposés à l'action des rayons violets et ultra-violets du spectre..... 316

§ 3. Action des écrans colorés et de diverses sources lumineuses. Lumières artificielles; lumière électrique. Tubes à gaz raréfiés avec matières phosphorescentes..... 322

Chap. IV. *Composition de la lumière émise par les corps phosphorescents.*

§ 1. Appareils employés..... 334

§ 2. Alumine et ses combinaisons..... 337

§ 3. Diamant..... 348

§ 4. Composés à base de calcium : carbonate, fluorure, phosphate, silicate, etc. 353

§ 5. Composés à base alcalines et terreuses..... 372

§ 6. Sels d'uranium, platino-cyanures et substances diverses..... 378

Chap. V. *Influence de l'état et de la nature des corps sur les effets de phosphorescence par insolation. Extinction des rayons actifs; rayonnement des corps phosphorescents.*

§ 1. Influence de la température; action temporaire..... 385

§ 2. Influence de la température; modification permanente..... 394

§ 3. Influence de l'état du corps; état solide et état liquide. Forme cristalline. 397

§ 4. Influence de la direction des rayons incidents. Extinction des rayons actifs. 399

§ 5. Rayonnement des corps phosphorescents. Effets chimiques, phosphorogéniques et calorifiques produits par son action..... 401

Transmission de l'effet de phosphorescence au delà des points impressionnés..... 404

Résumé et conclusion du livre 6..... 406

## LIVRE VII.

### EFFETS LUMINEUX PRODUITS PAR LES CORPS ORGANISÉS.

Chap. Ier. *Phosphorescence des végétaux.*

§ 1. Matières végétales; bois lumineux..... 409

§ 2. Phosphorescence des végétaux vivants..... 411

Pages.

Chapitre II. *Phosphorescence des animaux.*

§ 1. Phosphorescence des matières animales..... 414

§ 2. Phosphorescence des animaux vivants..... 416

§ 3. Phosphorescence de la mer..... 420

## ADDITIONS ET ERRATA.

Note relative à la lumière prise pour unité dans la comparaison des pouvoirs éclairants de becs de gaz..... 423

Note relative à l'incandescence des corps solides colorés..... 425

FIN.

# IIe PARTIE.

## EFFETS DE LA LUMIÈRE.

## PRÉLIMINAIRES.

### EFFETS DIVERS PRODUITS PAR LA LUMIÈRE.

#### EXTINCTION DE LA LUMIÈRE; TRANSPARENCE, DIFFUSION ET COULEURS DES CORPS.

Un faisceau de rayons solaires ou de rayons émanés d'une source lumineuse d'une intensité suffisante non-seulement impressionne la rétine en donnant la sensation de la lumière, mais encore produit sur les corps des effets très-divers : il donne lieu à une élévation de température des corps placés sur sa route ; il peut produire des effets de phosphorescence qui ont été étudiés dans la première partie de cet ouvrage ; il peut opérer la décomposition de certaines substances ou provoquer leur combinaison ; il peut agir enfin sur des substances organiques et sur les végétaux en produisant différentes réactions chimiques ou des effets physiologiques.

D'un autre côté, l'influence des corps peut modifier la direction, la composition et l'intensité des rayons qui les pénètrent. Mais ces effets sont relatifs aux changements que les ondes lumineuses reçoivent dans leur propagation au travers des corps et font partie des questions d'optique qui se trouvent développées dans les traités de physique ; on ne saurait donc s'en occuper ici. On ne parlera pas non plus des phénomènes de phosphorescence qui ont été analysés avec détails dans le pre-

mier volume. On avait prétendu que les rayons solaires avaient le pouvoir d'aimanter des aiguilles d'acier; mais il a été reconnu que les actions magnétiques observées tenaient à des causes étrangères à l'influence lumineuse (1). On ne pourrait affirmer que les diverses actions physiques, chimiques et physiologiques citées ci-dessus soient les seules que la lumière puisse produire, mais on peut dire que ce sont les seules qui aient été observées.

Toutes les observations faites jusqu'ici tendent à montrer que ces différents effets sont dus à la transmission de mouvements vibratoires des sources lumineuses aux corps qui en reçoivent l'influence. Il se manifeste tel ou tel de ces effets suivant peut-être le genre de mouvement communiqué aux corps ainsi que, selon la longueur d'onde des rayons lumineux et la nature des corps.

On ne connaît pas le genre de mouvement moléculaire qui donne lieu dans les corps au phénomène de chaleur. On ne sait pas non plus si lors de la transmission des vibrations aux molécules des corps les vibrations perpendiculaires à la direction des rayons lumineux, et qui produisent la sensation de la lumière, donnent seules des actions calorifiques et chimiques, et si des vibrations dans le sens longitudinal ne pourraient pas être transmises aux corps et engendrer quelques-uns des effets dont il s'agit. Cependant, les effets de polarisation observés dans le rayonnement de la chaleur ainsi qu'avec les matières chimiquement impressionnables, effets qui sont semblables à ceux que les rayons lumineux produisent, font présumer que le même genre de mouvement vibratoire donne lieu à ces différents ordres de phénomènes. Quoi qu'il en soit, les différentes actions que l'on observe dépendent de l'influence d'un même rayonnement qui se trouve modifié suivant la nature des corps impressionnables ainsi que suivant la réfrangibilité et l'intensité des rayons actifs.

Les effets produits les plus généraux sont les effets de chaleur, et il est possible que si tous les rayons étaient suffisamment intenses, quelle que soit leur longueur d'onde, ils donneraient lieu par absorption dans les corps qu'ils frappent à une élévation de température. D'après cette hypothèse, qui est actuellement la plus probable, les rayons lumineux émanés d'une source éclairante ne différeraient des

(1) Voir Becquerel, *Traité exp. d'électricité* en 7 v., t. 1, p. 384. J. Herschell, *Traité de la lumière*, t. 2, p. 87; traduct. française par M. Quetelet.

rayons calorifiques qu'en ce que, indépendamment de l'action générale de chaleur, ils exerceraient sur la rétine une action physiologique, et sur certains corps des effets chimiques dont l'intensité ne serait pas en rapport avec l'intensité calorifique produite et ne dépendrait que de la longueur d'onde des rayons actifs, de la sensibilité de la rétine ou de la nature des réactions chimiques qui peuvent se produire.

Les différents effets que la lumière peut engendrer sont inégalement appréciables par la rétine ou par les appareils destinés à leur étude, ce qui revient à dire que la sensibilité de la rétine et de ces appareils n'est pas la même pour une intensité déterminée d'un faisceau de rayons lumineux. Les thermomètres ou les piles thermo-électriques que l'on peut employer exigent une action d'une certaine énergie pour donner des indications : l'on sait qu'un thermomètre exposé au soleil ne monte guère au delà de 40 à 50°; en admettant qu'on puisse évaluer le $\frac{1}{100}$ de degré thermométrique centigrade, on ne pourrait estimer que le $\frac{1}{4000}$ ou $\frac{1}{5000}$ de l'action solaire; aussi ne peut-on pas évaluer l'action calorifique de la lune, dont le rayonnement est 800000 fois moins intense que celui du soleil (1). Mais, d'un autre côté, l'on peut apprécier l'action de rayons relativement bien moins intenses au moyen des effets chimiques, des phénomènes de phosphorescence ainsi que des impressions sur la rétine : les photographies de la lune et des planètes indiquent en effet quelle est la sensibilité des réactions chimiques opérées par la lumière; on a vu également dans le premier volume que des rayons d'une intensité bien moindre que celle des rayons lunaires pouvaient rendre phosphorescents certains corps, et l'on a rapporté (2) les expériences qui indiquent quelle était la faible intensité des rayons que l'œil pouvait apprécier et entre quelles limites d'une étendue vraiment prodigieuse cet organe pouvait être impressionné; pour en donner une idée on peut dire que si l'on représente par l'unité l'intensité lumineuse d'une bougie, la lumière solaire est plus de 50000 fois plus intense, et que les corps très-faiblement phosphorescents dont l'intensité n'est que de $\frac{1}{150000000}$ de la première peuvent encore être distingués dans l'obscurité.

La lumière ne peut frapper un corps sans qu'une partie du mouvement ondulatoire ne soit éteint, et cela proportionnellement à l'action

(1) Voir tome 1er, page 5.
(2) Id., id, page 296.

produite dans le corps, le mouvement transmis étant employé à modifier ce corps physiquement ou chimiquement; on dit alors qu'il y a extinction ou absorption de lumière. Si l'on n'observait aucune action calorifique, aucun effet physique ou chimique, l'intensité des rayons transmis par un corps, jointe à celle des rayons réfléchis et diffusés, devrait reproduire l'intensité des rayons incidents; mais tel n'est pas le cas ordinaire, car on n'a trouvé jusqu'ici aucun corps absolument transparent pour la chaleur, quelle que soit la longueur d'onde des rayons, et parfois les corps éprouvent des changements chimiques ou donnent lieu à des effets de phosphorescence. Cette conclusion suppose que le mouvement lumineux en se transmettant aux corps ne donne lieu qu'aux phénomènes physiques ou chimiques cités plus haut; car s'il se produisait des mouvements moléculaires ne correspondant à aucun phénomène connu, il pourrait y avoir extinction de lumière sans effet actuellement appréciable. Ces motifs font supposer qu'il est bien difficile de déterminer ce que l'on pourrait nommer l'équivalent mécanique de la lumière à moins de connaître tous les effets qu'un faisceau lumineux pourrait produire sur un corps, ou de s'en tenir à une certaine approximation, si avec certains corps l'un quelconque de ces effets, l'effet calorifique, par exemple, l'emportait de beaucoup sur les autres.

Lorsque la lumière frappe un corps, la quantité éteinte ou absorbée dépend de la nature et de l'état du corps ainsi que de l'état de sa surface et de son épaisseur. Les expériences démontrent que les corps les plus transparents, solides, liquides ou gazeux, diminuent l'intensité des rayons lumineux (1). Cette absorption peut être très-grande avec les substances colorées et surtout avec les corps noirs; dans ce dernier cas elle est complète sous une épaisseur assez faible, et il n'échappe à l'absorption que la lumière réfléchie et diffusée.

(1) Dans chaque corps l'extinction dépend de l'épaisseur de ce corps. Soit I l'intensité d'un faisceau lumineux incident; soit I' l'intensité du faisceau transmis après qu'il a traversé une épaisseur $e$ du corps, en faisant abstraction de la perte par réflexion à la surface; soit encore $n$ le coëfficient d'absorption ou la fraction qui représente ce que l'intensité lumineuse est devenue après l'épaisseur 1 du corps :

après l'épaisseur 1 l'intensité lumineuse I est devenue $I_1 = nI$
après l'épaisseur 2..... elle est $I_2 = nI_1 = n^2I$
etc.
et après l'épaisseur $e$..... $Ie = n^eI$
c'est-à-dire que l'on a $I = In^e$

En général, l'absorption est élective, c'est-à-dire qu'elle n'a pas lieu indifféremment et avec la même intensité pour tous les rayons quelle que soit leur longueur d'onde. L'absorption quelquefois a lieu pour certains rayons et ne se produit pas pour des rayons de plus grande ou de moindre réfrangibilité, et alors les corps placés sur le trajet d'un faisceau lumineux, avant ou après sa réfraction par un prisme, donnent lieu à un spectre discontinu présentant des raies noires ou des bandes suivant la la largeur des espaces qui manquent dans l'image prismatique; mais souvent aussi cette absorption se produit en totalité au delà ou en deçà d'une certaine réfrangibilité, et dans ce cas des parties entières du spectre peuvent disparaître, soit les parties les plus réfrangibles, soit celles les moins réfrangibles, comme on en aura des exemples dans les livres suivants.

L'on a vu dans le premier volume, pages 162 et suivantes, quels sont les effets remarquables produits à des températures plus ou moins hautes par les vapeurs agissant comme écrans sur les rayons lumineux, et comment l'absorption qui se produit alors donne lieu au phénomène des raies noires du spectre solaire; les effets curieux que présente la vapeur d'eau et dont il a été question tome I^er^, page 134, montrent que les gaz permanents donnent les mêmes effets que les vapeurs à des températures élevées. Bien que cette absorption, en éliminant une certaine quantité de rayons, doive rendre colorées ces matières sous une certaine épaisseur, cependant cette coloration n'est souvent pas appréciable. Quand les gaz sont fortement colorés, ce phénomène devient très-tranché; ainsi la vapeur nitreuse et la vapeur d'iode donnent des raies nombreuses, et ces raies, par leur largeur, peuvent devenir alors de véritables bandes noires. Quelquefois même les gaz absorbent des parties entières du spectre et ne présentent pas de raies ou bandes définies; tel est le cas du chlore, qui absorbe complétement la partie du spectre plus réfrangible que la raie F, c'est-à-dire le bleu et le violet prismatique.

Les liquides transparents donnent également lieu à des phénomènes semblables; mais cette absorption, quand elle n'est pas complète pour certaines parties du spectre, donne plutôt des bandes que des raies noires; parmi les dissolutions qui présentent ces effets d'une manière remarquable on doit citer les dissolutions des sels d'erbium et de dydyme.

D'après MM. Bahr et Bunsen (1), les dissolutions des sels d'erbium,

(1) *Ann. de chimie de physique*, 4^e^ série, t. 9, p. 484.

interposées sur le trajet d'un faisceau de rayons lumineux avant sa réfraction dans le prisme d'un spectroscope, présentent huit raies ou plutôt huit bandes noires, deux dans le rouge vers B et C, quatre dans le vert près de E et deux dans le bleu entre F et G. Ce qu'il y a de particulier, comme on l'a déjà vu tome Ier, page 164, c'est que les positions de ces bandes coïncident exactement avec celles des huit bandes lumineuses que donne l'erbine incandescente placée dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz. Ainsi les composés de l'erbium offrent un exemple remarquable d'une substance qui porte dans ses combinaisons le même pouvoir d'absorption sur les rayons lumineux que celui dont elle est douée elle-même, mais à des températures différentes; le renversement des raies brillantes en raies obscures a donc lieu, non-seulement à égalité de température, mais encore entre différents points de l'échelle thermométrique, ce qui montre que le pouvoir d'absorption des sels d'erbium sur certains groupes de rayons lumineux se maintient entre des limites calorifiques différentes.

Les dissolutions des sels de dydyme placées dans les mêmes conditions donnent des effets d'absorption analogues. Pour faire aisément l'expérience, on prend une dissolution assez concentrée de sulfate de dydyme renfermée dans un écran en verre à faces parallèles que l'on place sur la route d'un faisceau lumineux émané d'un bec de gaz, avant sa réfraction dans un spectroscope. On trouve alors que l'image du spectre est traversée par plusieurs raies ou bandes noires : on distingue plusieurs raies fines entre les raies A et D du spectre solaire, dont l'une située près de B est assez forte. Près de D il se trouve une bande remarquable par sa largeur et par la netteté avec laquelle elle termine les parties voisines de l'image prismatique. Dans le vert, entre E et F, il y a plusieurs bandes dont quatre sont bien distinctes et entre F et G, dans le bleu, on voit quatre bandes inégales de largeur. Il faut remarquer en outre, que l'image du spectre ainsi observée, ne comprend pas une seule ligne se trouvant aux mêmes places que celles des lignes des sels d'erbium.

Lorsque les substances placées ainsi sur la route des rayons lumineux avant leur réfraction par un prisme offrent deux ou plusieurs maxima d'intensité, l'absorption inégale des rayons de diverse réfrangibilité suivant l'épaisseur de l'écran est la cause des changements de teinte observés quand on transmet directement la lumière blanche au travers d'une masse plus ou moins épaisse de matière. Telle est

l'explication du dichroïsme offert par une dissolution de chlorure de chrome qui est verte par transmission sous une petite épaisseur, et rouge sous une plus grande épaisseur; la dissolution de tournesol dans les mêmes conditions passe du bleu au rouge. D'autres corps peuvent présenter également des changements de nuances, quand ils sont vus par transmission sous des épaisseurs variables, et ils ne paraissent pas de même couleur par transmission ou par réflexion.

Les corps solides transparents donnent lieu à des effets du même genre, mais dans les images prismatiques les bandes d'absorption sont moins nettement terminées qu'avec les gaz ou les liquides dont on vient de parler. On verra dans les livres suivants que les corps solides transparents et incolores peuvent absorber plus ou moins les parties infra-rouges ou ultra-violettes du spectre lumineux; mais quand ils sont colorés, leur coloration indique leur grande puissance absorbante pour certains groupes de rayons lumineux. On peut comme exemple citer les effets produits par le verre bleu coloré par le cobalt : quand on place sur le trajet des rayons lumineux, avant ou après leur réfraction, une lame de ce verre mais dont la couleur est un peu claire, on voit une image prismatique formée de trois parties lumineuses; la première rouge, la deuxième jaune verdâtre, la troisième bleue et violette, et il y a deux larges bandes obscures qui traversent l'image prismatique et dont les bords se fondent insensiblement avec les parties lumineuses voisines. Si la lame de verre bleue est plus foncée, la partie lumineuse jaune verdâtre diminue d'intensité et finit par disparaître quand la coloration du verre est suffisante, et il ne reste que deux parties lumineuses dans le spectre, l'une rouge, l'autre bleue et violette. Les verres bleus colorés par le cuivre ne se comportent pas de même; ils absorbent les rayons rouges extrêmes.

Les matières colorées en rouge ne laissent passer généralement que la partie la moins réfrangible du spectre, tandis que celles qui sont colorées en violet ou en bleu absorbent ces mêmes rayons et laissent passer la partie la plus réfrangible du rayonnement lumineux.

Les verres très-foncés et presque noirs sont de deux sortes; les uns ne laissent passer que des rayons rouges ou du moins font paraître rouge le disque du soleil quand on regarde directement cet astre au travers de ces écrans; les autres ne laissent passer que des rayons verts.

Quand le pouvoir absorbant d'un corps pour la lumière est très-grand, la quantité de rayons transmis diminue rapidement à mesure que l'é-

paisseur augmente, et l'on arrive promptement à l'opacité complète. Telle est l'explication des effets produits par les corps opaques, car chacun d'eux, pris sous une très-petite épaisseur, se comporte comme un corps transparent. On peut citer comme exemples les effets produits par les métaux : une lame métallique de $\frac{1}{2}$ ou de $\frac{1}{4}$ de millimètre, quelle que soit sa nature, intercepte complétement les rayons solaires directs, mais en diminuant son épaisseur, quand celle-ci se trouve réduite à une fraction de millième de millimètre, alors la transmission de la lumière peut avoir lieu. Bien plus, on observe des effets de coloration du même genre qu'en agissant avec les solides et les liquides transparents, ce qui montre que chaque métal exerce une action différente sur les divers rayons lumineux; ainsi l'or battu en feuilles très-minces, déposé sur une lame de verre afin de pouvoir être observé, est vert par transmission, tout en conservant sa couleur jaune par réflexion, tandis que l'argent, quoique plus absorbant que l'or, en couche suffisamment mince et dans les mêmes conditions paraît bleu (1).

Ces effets de coloration des lames métalliques très-minces dépendent de l'état physique dans lequel se trouvent les métaux : Faraday a reconnu (2) qu'une feuille d'or battu suffisamment mince n'est verte par transparence que parce qu'elle est écrouie; si cette lame est placée sur du verre afin de pouvoir être recuite, et qu'elle soit portée à la température rouge, après cette action, elle paraît d'une teinte rouge ou violet rouge plus ou moins pâle, suivant son épaisseur, absolument comme le verre coloré en rouge par l'or. En comprimant de nouveau la feuille d'or, elle redevient verte par transmission. Dans chaque cas, elle ne cesse jamais d'être jaune par réflexion.

(1) M. de la Provostaye et Desains ont observé que si les rayons calorifiques incidents sur une surface enduite de noir de fumée ont l'incidence rasante, les rayons diffusés transmis ont le même plan de polarisation que les rayons incidents, tandis qu'avec une lame d'or dans les mêmes conditions les rayons émergents ont leur plan de polarisation perpendiculaire au plan d'incidence, comme lors de la transmission par réfraction (*Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 34, p. 226).

M. Knoblauch en opérant avec la chaleur rayonnante a montré que la transmission au travers des lames métalliques se faisait dans des conditions analogues à celle qui a lieu au travers des écrans diathermanes (*Ann. de Pogg.*, t. 101, p. 161. *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 51, p. 503, 1857).

Voir aussi par la transmission de la lumière au travers de l'argent, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 63, septembre 1866.

(2) *Transact. philosoph.*, t. 147, p. 145, 1857. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 53, p. 60.

Faraday a observé encore que les autres métaux présentent des effets analogues, quoiqu'à des degrés différents : l'argent donne une teinte brune quand le métal est recuit, et une couleur bleue quand la couche métallique est comprimée; le cuivre est rouge par réflexion et vert par transmission, quel que soit son degré de recuit ou d'écrouissage. Les autres métaux donnent des effets qui se rapprochent soit de ceux de l'or et de l'argent, soit de ceux du cuivre, c'est-à-dire que pour quelques-uns l'écrouissage change les conditions de transmission de la lumière, tandis que pour d'autres il ne les modifie pas.

Il résulte des mêmes observations que l'or en suspension dans les liquides les colore en rouge ou en violet, suivant les circonstances, et que la lumière transmise se comporte comme ayant traversé un écran transparent; le passage de la lumière a donc lieu au travers des particules métalliques.

On a supposé que les corps incolores ou colorés étaient diaphanes et que la lumière qui n'était pas absorbée les traversait librement; mais il n'y a pas de corps absolument transparent et leurs particules projettent de la lumière diffuse dans tous les sens, soit en avant du côté d'où vient la lumière, soit au delà, c'est-à-dire par transmission. Ainsi une lame de verre ou une couche d'eau placées sur le trajet d'un faisceau lumineux que l'on introduit dans une chambre noire, et vues de côté, donnent une certaine diffusion tout autour des points frappés par les rayons directs. Ces rayons diffusés peuvent provenir, dans quelques cas, des effets de phosphorescence dont on a déjà parlé dans le premier volume (1); mais dans la plupart des circonstances ils sont dus à une réflexion de la lumière sur les particules du milieu éclairé.

Quand les matières sont hétérogènes, cette diffusion augmente beaucoup, et les corps ne sont plus que translucides ou troubles sous une petite épaisseur, et quand leur épaisseur devient plus grande, de même que les métaux ils sont complétement opaques. Telles sont les matières organiques comme l'ivoire, le bois, le papier, etc.

On a fort peu étudié les phénomènes de diffusion des rayons lumineux, si ce n'est pour reconnaître la direction du plan de polarisation suivant l'inclinaison des rayons incidents sur un écran translucide comme le papier, le carton, l'ivoire, un métal dépoli, ou bien selon la position des rayons diffusés. Les observations faites avec les rayons

(1) Voir tome 1er, page 316.

calorifiques ont montré à Melloni (1) que les corps placés dans les mêmes conditions diffusent inégalement les rayons différemment réfrangibles. Ce physicien a reconnu qu'en général les corps blancs diffusent fortement les rayons très-réfrangibles et faiblement les rayons peu réfrangibles émanant de sources à basses températures. Ce résultat explique pourquoi les rayons les moins réfrangibles sont transmis avec plus d'intensité par certains corps translucides blancs, et pour quel motif quand leur épaisseur augmente ces matières paraissent jaunâtres ou rougeâtres avant de devenir opaques; tels sont la magnésie maintenue en suspension dans l'eau, le lait, etc. La diffusion qui est très-forte pour les rayons très-réfrangibles fait paraître ces corps blancs et même bleuâtres par réflexion, et jaunâtres par transmission. En effet, la lumière transmise comprend celle qui échappe à la diffusion par réflexion ainsi qu'à l'absorption; plus cette diffusion est grande, plus la partie transmise est faible à égalité d'absorption, et vice-versa; en outre, la couleur des rayons diffusés est complémentaire de celle des rayons transmis.

Il est facile de voir que selon la proportion relative de lumière diffusée ou transmise, un même corps peut devenir plus ou moins translucide; ainsi, en introduisant dans une matière hétérogène trouble ou peu translucide une substance dont l'indice de réfraction se rapproche plus de l'indice de la matière que celui de l'air, la proportion de la lumière diffusée est moindre et la quantité de lumière transmise est plus grande, à égalité d'épaisseur. Tel est l'effet qui se produit quand on mouille du papier ou mieux qu'on l'imbibe d'huile ou de vernis; la nuance du corps ne change pas s'il n'est pas sensiblement coloré.

Si le corps est en poudre, il en est de même, mais la nuance de la poudre peut changer s'il s'agit d'un corps coloré. En effet, de la poudre de verre coloré ou d'une substance transparente sous une faible épaisseur, quand elle est sèche, tend à paraître plus blanche si la poussière est fine; car la lumière diffusée à la surface des particules est blanche si le pouvoir de diffusion est le même pour tous les rayons lumineux, et il n'y a que celle qui pénètre à une certaine profondeur qui se nuance de la couleur du corps. Dans le cas ou cette poussière est humectée d'eau ou d'huile, alors la quantité de lumière diffusée est moindre et il arrive plus de lumière d'une certaine profondeur; la poudre devient donc plus

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 75, p. 337, (1840).

sombre, car la partie lumineuse absorbée augmente, et en même temps la nuance change si le corps est coloré. On peut citer à l'appui de cette explication ce fait que de la poussière de verre coloré paraît plus blanche quand elle est plus fine et devient plus sombre quand on la mouille; en outre, dans ce dernier cas sa couleur se rapproche d'autant plus de celle du verre que les fragments sont plus gros. S'il s'agit de corps très-absorbants placés dans les mêmes conditions, comme le minium, les précipités métalliques, etc..., les différences sont moins grandes (1).

La translucidité du bois donne lieu à un effet curieux : des planches de sapin de 1 à 2 millim. d'épaisseur, vues par transmission au moyen d'une forte lampe ou d'un faisceau de rayons solaires, paraissent d'une nuance jaune orangé. Si la planche renferme des nœuds, dont la direction des parties ligneuses, comme on le sait, est perpendiculaire au plan de la planche, et si les nœuds sont imprégnés de sève résineuse, ils paraissent beaucoup plus translucides que le reste de la planche et prennent par transmission une teinte orangée plus vive et plus intense. Dans ces conditions une planche de sapin épaisse de 1 à 2 centimètres est sensiblement opaque, et n'est translucide qu'aux endroits où se trouvent les nœuds; là elle donne par transmission une belle couleur orangée. Si les nœuds ont perdu leur sève ou leur résine, ils ne diffèrent pas sensiblement du reste de la planche.

Le noir de fumée, d'après Melloni (2), diffuse également les rayons de toute réfrangibilité quoique très-faiblement. Il a encore observé que cette matière placée en couche très-mince sur la surface d'un écran en sel gemme, arrête les rayons les plus réfrangibles, mais laisse passer la partie la moins réfrangible de l'image prismatique, en sorte que la lame de sel enfumé est presque aussi transparente pour les rayons provenant des sources calorifiques obscures, c'est-à-dire pour les rayons infra-rouges, que lorsqu'elle est blanche et limpide.

Les divers principes énoncés plus haut rendent compte des faits relatifs à la couleur des corps et à leur transparence, et cela indépendemment de toute théorie. Newton (3) a proposé une explication des couleurs par le phénomène des lames minces, laquelle suppose que les particules des corps translucides ou opaques sont assez transpa-

(1) Helmholtz, *Optique physiologique;* Paris, 1867, page 363.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 9, p. 315 (1839).
(3) Newton, *Traité d'optique*, livre 2, 3e partie.

rentes pour que la lumière qui les frappe éprouve des réflexions tant à son entrée qu'à sa sortie. D'après cette hypothèse, et suivant la théorie des ondulations on expliquerait de la manière suivante, par un effet d'interférence, les couleurs des milieux translucides en supposant que toutes les particules aient les mêmes dimensions (1) : si dans un milieu homogène se trouve un corps d'une épaisseur infiniment petite dans lequel la lumière pénètre et si les rayons se réfléchissent à l'entrée et à la sortie, la différence de chemin parcouru est nulle, mais, par le fait de la différence de réflexion, les deux rayons sont en retard l'un sur l'autre d'une demie ondulation; les deux rayons alors se détruisent, et l'on peut dire qu'il n'y a pas de réflexion et que la totalité de la lumière est transmise. Lorsque le corps a une épaisseur sensible, alors la différence de route est plus grande, la destruction du faisceau moins complète, et l'épaisseur augmentant, il arrive un moment où la différence des distances parcourues par la lumière est une demi-longueur d'onde, et où le retard des deux rayons, par le fait de la réflexion dans deux plans à angle droit, est une longueur d'onde complète; on a alors le maximum de clarté par réflexion. On voit que les rayons lumineux dont la longueur d'onde est la plus courte, c'est-à-dire les rayons violets et bleus, seront réfléchis les premiers en plus grande abondance et par conséquent manqueront les premiers pour la transmission; la teinte par transmission du milieu translucide devra donc paraître celle des rayons de plus grande longueur d'onde, c'est-à-dire jaunâtre on rougeâtre.

Cette hypothèse ne saurait expliquer seule les effets de coloration observés, car l'absorption de la lumière par les corps dépend de la nature de ceux-ci, et, comme on l'a vu précédemment, chacun d'eux absorbe des parties différentes du spectre solaire; la coloration des milieux translucides ou troubles ne tient donc pas seulement à un phénomène d'interférence. En général, les effets ont lieu dans le sens qui vient d'être indiqué, c'est-à-dire que ce sont les rayons les moins réfrangibles qui sont les moins absorbables; mais la teinte plus ou moins jaune ou rouge par transmission de la matière translucide dépend de la couleur de celle-ci. On a vu, en effet, que le papier conservait sensiblement la teinte blanche quand son opacité augmentait; l'ivoire paraît être à peu près dans les mêmes conditions; le lait, la magnésie en suspension dans l'eau donnent à la lumière diffusée par réflexion une

(1) E. Brücke, *Ann. de Poggendorf*, t. 88, p. 63 (1852).

teinte bleuâtre et à la lumière transmise une teinte jaunâtre; le bois de sapin, comme on l'a vu plus haut, est orangé. On suppose bien entendu que la diffusion a lieu sans produire de phosphorescence et sans transformation de mouvement vibratoire; autrement, les effets de coloration se compliquent des phénomènes qui ont été étudiés dans la première partie, tome 1er, page 316 et suivantes. Quant aux couleurs naturelles des corps, tels que les précipités métalliques ainsi que les couleurs végétales, elles sont dues à la réflexion ou à la transmission des rayons qui ne sont pas absorbés par ces corps.

Les masses gazeuses donnent lieu à des effets de diffusion analogues aux précédents, et l'atmosphère qui enveloppe la terre et la sépare des espaces planétaires, interposée entre les astres lumineux et un observateur, forme comme un voile qui réfléchit en tous sens la lumière en donnant lieu à un grand nombre de phénomènes optiques remarquables. C'est par suite de la diffusion de la lumière sur les molécules atmosphériques que les diverses régions du globe ne sont pas plongées tout à coup dans les ténèbres lorsque le soleil quitte l'horizon; de sorte que l'air qui s'oppose à ce que la terre, après le coucher du soleil, soit exposée à un refroidissement considérable pendant la nuit, en réfléchissant les rayons lumineux dans tous les sens, rend visibles les objets qui ne sont pas directement éclairés par cet astre.

La teinte bleue du ciel provient de la réflexion des rayons lumineux sur les particules d'air; elle indique un pouvoir diffusif plus grand de ces particules pour les rayons bleus. Cette couleur est du reste modifiée par la présence des vapeurs, des nuages, et des corps étrangers qui sont en suspension dans l'air. Il résulte de ce fait, et de ce qui a été dit précédemment, que les rayons les plus réfrangibles doivent être éteints de préférence quand la lumière blanche traverse une certaine épaisseur de l'atmosphère; ainsi, dans ce cas, les rayons jaunes et rouges doivent subir une moindre diminution d'intensité (1). C'est de cette manière que l'on explique les couleurs des astres près de l'horizon, ainsi que les teintes de l'aurore et du crépuscule. D'après les mêmes motifs il est permis de supposer que parmi les rayons émanés du soleil, il y a des rayons ultra-violets qui sont absorbés par l'atmosphère et qui n'arrivent pas jusqu'à nous.

Ces détails suffisent pour montrer que les phénomènes d'absorption

(1) L. Reynaud, *Mémoire sur le balisage et l'éclairage des côtes de France*, 1864.

ou d'extinction de lumière qui ont déjà conduit à des découvertes importantes, comme on l'a vu dans le premier volume, peuvent donner des indications précieuses sur la nature et sur l'état physique des corps ainsi que sur le mode d'action de l'agent lumineux.

En terminant ce rapide exposé et avant de parler des effets physiques, chimiques et physiologiques produits par la lumière, on doit ne pas perdre de vue qu'à l'époque actuelle, où l'action calorifique centrale n'intervient plus dans les phénomènes de la vie sur la terre, et où les variations des saisons sont dues à l'influence solaire (1), le principe de l'équivalence des forces physiques conduit à cette conséquence que toute source de force vient du soleil. C'est par l'action calorifique et chimique de ses rayons que la vie organique peut avoir lieu et que le carbone est accumulé dans les végétaux, lequel étant brûlé dans nos foyers devient notre principale source de chaleur. Ainsi l'action des rayons solaires s'emmagasine pour ainsi dire et ne se traduit au dehors que lors de la transformation des produits que son influence a fait naître.

(1) Voir Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité de physique terrestre et de météorologie*, page 38 et suivantes (1847).

# LIVRE PREMIER.

## EFFETS CALORIFIQUES.

## CHAPITRE PREMIER.

### Phénomènes généraux. — Appareils employés.

§ 1er. *Effets généraux. Miroirs ardents, Lentilles.*

Quand on se trouve exposé aux rayons du soleil ou à ceux d'un foyer brillant, l'effet le plus immédiat que l'on peut constater est la sensation de chaleur que l'on éprouve et l'élévation de température des corps soumis à l'influence de ces rayons. L'action calorifique augmente quand on reçoit sur un miroir concave ou sur une lentille convergente une certaine quantité de rayons qui viennent se réunir vers leur foyer, et les rayons solaires peuvent devenir alors une de nos plus puissantes sources de chaleur.

D'après quelques passages d'auteurs grecs et latins, la propriété que possèdent les lentilles de verre et les miroirs concaves de concentrer la chaleur, comme la lumière, dans les points où convergent les rayons solaires était fort anciennement connue. Ainsi il paraît qu'Aristophane dans une de ses comédies (1) propose de fondre des tablettes en cire au moyen d'une boule de verre exposée au soleil. Pline, dans son histoire naturelle, dit que « des boules de verre remplies d'eau, opposées « aux rayons du soleil, s'échauffent tellement qu'elles brûlent les étof-

(1) *Encyclopédie*, édition originale in-fol, t. Ier, p, 624. Article, Miroirs ardents. Dutens, *Recherches sur l'origine des découvertes...*, t. 2, p. 138 ; Paris, 1766.

fes (1) ». Et plus loin, « Je lis chez des médecins que le meilleur cau-« tère est une boule de cristal recevant les rayons du soleil (2) ».

Les propriétés des miroirs courbes étaient également connues vers cette époque, car Plutarque, en parlant de Numa (3), dit que dans le temple de Delphes et à Athènes quand le feu sacré vient à s'éteindre, les prêtresses en allument un tout nouveau « en tirant du soleil une flamme « pure et nette par le moyen de certains vases d'airain concaves et « taillés selon la section conique en triangles rectangles, de manière « que toutes les lignes de la circonférence aboutissent à un point du « centre. On les expose au soleil; tous les rayons se rassemblent et se « réunissent dans ce seul point, et prenant corps et force de feu par la « reverbération, ils subtilisent et enflamment si fort l'air, qu'il embrase « très-promptement la matière sèche et aride qu'on lui présente ». Cette description se rapporte évidemment à un miroir de forme concave construit au moyen de miroirs plans d'airain.

Si l'on en croit les récits de quelques historiens, ce fut par l'emploi de miroirs de ce genre qu'Archimède incendia à distance la flotte romaine lors du siége de Syracuse par Marcellus, l'an 212 avant J.-C. Ce fait a été revoqué en doute, non-seulement en raison des dimensions que l'on devait supposer à ces miroirs, mais encore parce que plusieurs des auteurs anciens qui ont parlé d'Archimède n'en ont pas fait mention. Aussi Dacier, traducteur de Plutarque, a-t-il émis l'opinion suivante (4) : « Il faut remarquer en passant que ni Polybe, ni Tite-« Live, ni Plutarque ne disent pas un mot des miroirs ardents avec « lesquels on prétend qu'Archimède brûlait les vaisseaux des Ro-« mains; c'est une tradition moderne qui n'a nul fondement. »

Descartes (5), en examinant l'étendue que doit avoir un miroir concave pour produire la combustion à une distance déterminée, a nié la possibilité du fait; car, dit-il : « Ces miroirs dont on a dit qu'Archimède « brûlait des navires de fort loin, devaient être extrêmement grands, « ou plutôt ils sont fabuleux ».

(1) Pline, livre 36, ch. 67. « Quum addita aqua vitreæ pilæ sole adverso, in tantum excandescant, ut vestes exurant. »

(2) Id., livre 37 ch. 10. « Invenio apud medicos, quæ sunt urenda corporum, non aliter utilius id fieri putare, quam cristallina pila adversis opposita solis radiis. »

(3) Les *Vies des hommes illustres* de Plutarque, tradition de Dacier, t. 1, p. 307-1721.

(4) Id., t. 3, page 200, en note.

(5) *Dioptrique*, discours 8e, édition publiée par Cousin, t. 5, p. 117.

A peu près à la même époque le père Kircher (1) traita la même question, et crut à la possibilité du fait. Il rappela que deux auteurs grecs du douzième siècle, Tzetzès et Zonare, avaient parlé des propriétés des miroirs ardents dont Archimède et Proclus avaient fait usage. D'après Tzetzès, « lorsque les vaisseaux romains furent à la portée du mi-« roir, Archimède fit faire une espèce de miroir hexagone et d'autres « plus petits de 24 angles chacun, qu'il plaça dans une distance pro-« portionnée, et qu'on pouvait mouvoir à l'aide de leurs charnières et « de certaines lames de métal; il plaça le miroir hexagone de façon « qu'il était coupé par le milieu par le méridien d'hiver et d'été en sorte « que les rayons du soleil reçus sur ce miroir, venant à se briser, allu-« mèrent un grand feu qui réduisit en cendres les vaisseaux romains « quoiqu'ils fussent éloignés de la portée d'un trait ». Zonare rapporte qu'au siége de Constantinople, sous l'empire d'Anastase Ier, l'an 514 de J.-C., Proclus brûla avec des miroirs d'airain la flotte de Vitalien qui assiégeait Constantinople; il ajoute que les miroirs étaient une découverte ancienne, et que l'historien Dion en attribue l'honneur à Archimède, qui s'en servit contre les Romains au siége de Syracuse.

Le père Kircher dit ensuite qu'à la place de miroirs courbes on peut se servir de miroirs plans juxtaposés et inclinés l'un sur l'autre, et donne une description (2) de la manière dont on peut les ajuster pour produire une forte chaleur par la réunion des images du soleil.

Jusque là on s'était borné à discuter la possibilité du fait sans essayer de le reproduire par expérience. Buffon, au milieu du siècle dernier (3), entreprit des recherches pour éclaircir ce point historique, pensant que si Archimède avait produit l'inflammation à distance, c'était au moyen de miroirs plans en métal poli et non de miroirs courbes. Il commença par montrer que, contrairement à l'assertion de Descartes, de grands miroirs produisent toujours plus d'effet que les petits, car si théoriquement une même étendue de foyer reçoit la même quantité de rayons dans l'un et l'autre cas, cependant, quand une surface plus grande est échauffée au même degré qu'une plus petite, la déperdition de la chaleur par conductibilité est moindre dans le premier cas que dans le second. Il fit construire ensuite un miroir formé de 168 glaces planes étamées, chacune d'elles ayant 6 pouces sur 8 pouces et étant inclinée l'une sur

(1) *Ars magna lucis et umbræ, Romæ*, 1645, livre 10, partie 3e, chap. Ier, p. 874.
(2) Ibid., page 887.
(3) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 65, page 82, 1747, et t. 66, p. 305.

l'autre de façon à ce qu'elles puissent agir comme des éléments d'un miroir courbe, et, suivant l'inclinaison des miroirs, réfléchir les rayons solaires sur une même surface à des distances diverses.

Au moyen de cette construction il put faire tomber sur le même point les 168 images du soleil formées par les miroirs plans et brûler des matières combustibles à des distances de 20, 30 et 150 pieds (ou 50 mètres). Dans la première expérience, qu'il fit le 23 mars 1747, il mit le feu à 66 pieds de distance à une planche de hêtre goudronnée, avec 40 glaces, c'est-à-dire avec $\frac{1}{4}$ du miroir. Dans une des suivantes, le 16 avril, il mit le feu à une planche de sapin goudronnée à 150 pieds (50 mètres) avec 128 glaces; l'inflammation fut très-subite et se fit dans toute l'étendue du foyer, qui avait environ 16 pouces de diamètre à cette distance. Plus tard, en 1749 et 1750, il fit construire un autre miroir de 360 glaces, dont chacune avait 4 pouces de largeur et de hauteur (c'est-à-dire de 10 à 11 centimètres).

Buffon, après avoir rapporté plusieurs expériences de fusion faites avec les miroirs, notamment la fusion de lames d'étain, d'argent et l'incandescence d'une plaque de tôle, dit que sans avoir l'espérance de brûler à de grandes distances, cependant on aurait pu aisément en augmentant le nombre des miroirs brûler des matières inflammables à des distances de 300 et de 600 pieds, c'est-à-dire à 100 ou 200 mètres.

Ainsi, ces expériences montrent la possibilité du fait attribué à Archimède dans le cas seulement où la combustion aurait eu lieu à une distance n'excédant pas 100 à 200 mètres; plus loin, cela n'aurait pas été possible. On ne sait pas si à cette époque les miroirs de verre étaient en usage, bien que, deux siècles et demi après, Pline ait dit (1) : « Jadis Sidon était célèbre par ses verreries; on y avait même inventé des miroirs de verre; » mais Archimède aurait pu faire usage de miroirs métalliques plans.

Parmi les miroirs ardents un peu puissants que l'on ait construits, et qui cependant ne donnaient pas l'inflammation des matières combustibles à une aussi grande distance que celui de Buffon, on peut citer ceux de Septala, chanoine de Milan, de Villette et de Tschirnhausen; celui de Septala brûlait à une distance de 15 ou 16 pas (15 ou 16 mètres). Zahn rapporte également qu'en 1699, à Vienne, un nommé Neumann

(1) Pline, livre 36-66. « Sidone quondam in officiis nobili : si quidem etiam specula excogitaverat. »

construisit un miroir en carton qui liquéfiait aisément les métaux à son foyer sous l'action des rayons solaires (1).

Actuellement les expériences d'incandescence et de fusion au moyen des rayons solaires convergents et réunis à une petite distance des appareils se font avec des miroirs sphériques en métal ou en verre argenté, ou plus facilement en se servant de lentilles de convergence. Les rayons solaires réfractés par une lentille doivent donner au foyer une image du disque solaire, dont l'étendue angulaire est d'environ $\frac{1}{2}$ degré, angle sous lequel nous voyons cet astre; la dimension de la surface de cette image dépend donc du diamètre de la lentille. D'un autre côté, l'aberration de sphéricité donne plus d'étendue à cette image, et en augmentant l'ouverture de la lentille on augmente aussi l'étendue de la surface focale, et on ne produit pas en chaque point une plus grande élévation de température; cependant, comme on l'a fait observer plus haut, le refroidissement étant moindre quand on se sert d'un grand miroir ou d'une grande lentille, il y a avantage à faire usage d'appareils d'une certaine dimension, qui peuvent permettre de porter à la fusion ou à l'incandescence de plus grandes quantités de matière.

Buffon (2) s'est également occupé de la construction des lentilles de verre destinées à produire des combustions; comme il avait observé la diminution d'intensité des rayons due à l'épaisseur des lentilles quand elles sont un peu grandes, il eut l'idée de la construction de lentilles à échelons, dont les parties annulaires ont le même foyer que la partie centrale, qui se trouve ainsi avoir une épaisseur restreinte. On sait tout le parti que Fresnel (3) a tiré de la construction de ces lentilles pour l'installation des appareils de phares et de la belle industrie dont ce physicien a doté la France. Au lieu de construire ces lentilles par fusion comme le proposait Buffon, il les a formées par parties séparées.

La fig. 40 représente une lentille à échelons disposée suivant le système de Fresnel et appartenant au Conservatoire des arts et métiers; son diamètre est de 70 centimètres et sa distance focale est de 1 mètre.

(1) *Encyclopédie*, article déjà cité. Voir aussi, pour l'antiquité des miroirs, *Amusements philosophiques*, etc., par le père Abat; Paris, 1763, page 433. Dutens, *Recherches sur l'origine des découvertes*, 1766; Montucla, *Histoire des mathém.*, t. 3, p. 525 et suiv. 1802.

(2) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 66, p. 305.

(3) Fresnel, *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares*, lu à l'Académie des sciences, le 29 juillet 1822. Voir *Mém. sur l'éclairage et le balisage des côtes de France*, par M. L. Reynaud, Paris, 1864, page 361.

Les parties annulaires ont sensiblement le même foyer que la lentille centrale; ce foyer consiste en un espace d'une certaine étendue se trouvant au milieu de la partie cylindrique AB, qui est supportée par les tiges latérales.

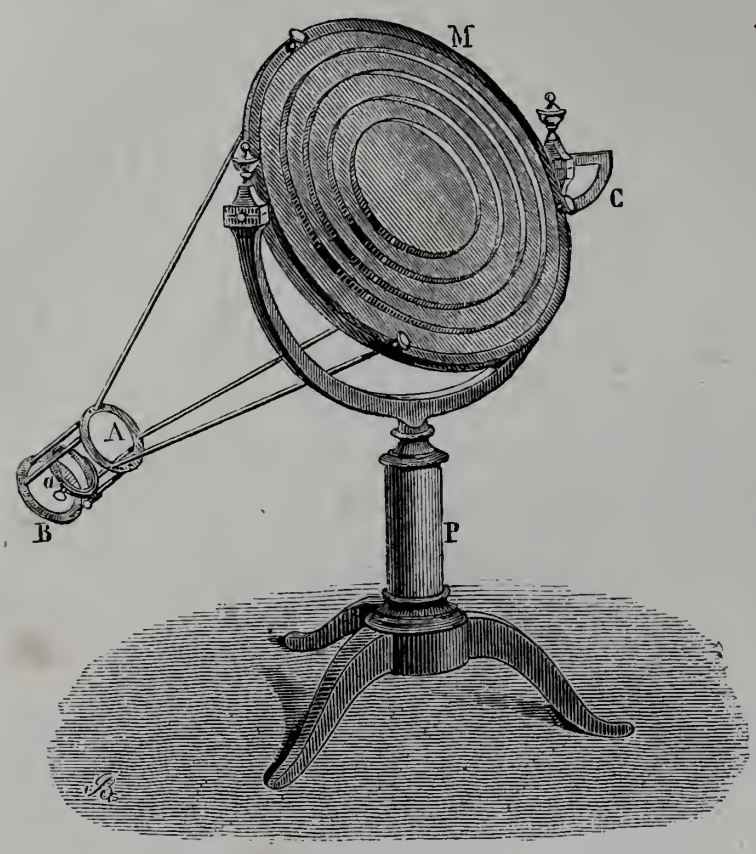



Fig. 40.

Pour opérer avec cet appareil, on le tourne et on l'incline au moyen du quart de cercle C, de façon à ce que les rayons solaires tombent perpendiculairement sur sa surface M, puis l'on approche les corps sur lesquels on veut agir de la partie centrale *a* de l'espace cylindrique AB, où se trouve le foyer des diverses parties de la lentille. On reconnaît alors que les métaux les plus réfractaires, comme le platine, l'iridium sont rapidement fondus, et que le charbon est porté à une incandescence qui n'est comparable qu'à celle que peut produire l'arc voltaïque.

On doit observer que l'action de cette source calorifique est nécessairement limitée par la température de la source rayonnante, c'est-à-dire du soleil, température qui ne saurait être dépassée, à moins d'admettre l'influence de l'intensité des rayons dans l'effet calorifique produit, comme on le dira dans le 3e paragraphe du second chapitre de ce livre; on a pu voir dans le premier volume, p. 122, que la limite extrême de 2000 à 2100 degrés ne saurait être dépassée, en supposant que la température de la photosphère solaire ne s'écarte pas beaucoup de celle que l'on obtient entre les charbons polaires d'une pile voltaïque.

Les sources brillantes ne sont pas les seules qui produisent de la chaleur par voie de rayonnement; les sources obscures donnent lieu à

des effets du même genre. Ainsi, les masses de fer échauffées au-dessous de 500°, les métaux comme le plomb, l'étain, qui sont à leur point de fusion, rayonnent à distance et agissent sur les thermoscopes et les thermomètres, mais n'influencent pas la rétine. Un corps, quel que soit son état calorifique, à la température ambiante comme à de très-basses températures, rayonne de la chaleur ainsi que Prévost de Genève l'a énoncé le premier, et le rayonnement entre les corps placés dans une même enceinte conduit à l'équilibre de leur température; c'est une conséquence nécessaire de l'hypothèse dynamique de la chaleur.

On A déjà vu dans le Ier volume, livre III, page 61 et suiv., en parlant des sources de lumière par l'action de la chaleur, que si l'on considère un centre de rayonnement dont la température s'élève, on observe plusieurs effets bien distincts :

1° A partir d'une limite déterminée de température, l'émission lumineuse devient sensible; cette limite est environ de 480 à 500° centigr.

2° Aux rayons émis à une température donnée viennent s'ajouter de nouveaux rayons de plus en plus réfrangibles.

3° A mesure que la température croît, l'intensité augmente pour chaque groupe de rayons de diverse réfrangibilité.

Il en est encore de même pour les rayons émis à basse température, et qui n'ayant pas d'action sur la rétine ont été nommés rayons obscurs; à chaque température correspond une limite supérieure de la réfrangibilité des rayons émis, et chacun de ces rayons différemment réfrangibles a une intensité correspondant à cette température. Du reste, ces rayons suivent les mêmes lois que celles qui régissent les propriétés des rayons de lumière; ils se refléchissent, se réfractent, se transmettent, se polarisent, interfèrent comme eux, conséquence d'une origine commune. Il n'est donc pas utile de décrire les phénomènes qui s'y rapportent, et il n'est pas nécessaire de s'y arrêter du moment que l'on admet l'identité des causes productrices de la chaleur et de la lumière. De même, il n'a pas été question des propriétés analogues de la lumière, puisque ce sujet est traité habituellement dans les ouvrages d'optique et sort du cadre que je me suis tracé.

### § 2. *Appareils thermo-électriques.*

On s'est borné pendant longtemps à faire usage des thermomètres à air ou à liquide pour l'étude du rayonnement de la chaleur, et l'on a pu

voir dans le premier volume, livre IV, page 143, le parti que l'on a pu tirer du thermomètre à air, à réservoir très-petit, pour observer la distribution de la chaleur dans le spectre solaire (1); mais depuis que Nobili et Melloni (2) ont construit une pile thermo-électrique d'une grande sensibilité, cet instrument est devenu indispensable pour les expériences sur la chaleur rayonnante (3); Melloni a même fait toutes ses recherches au moyen de cet instrument. La pile thermo-électrique représentée

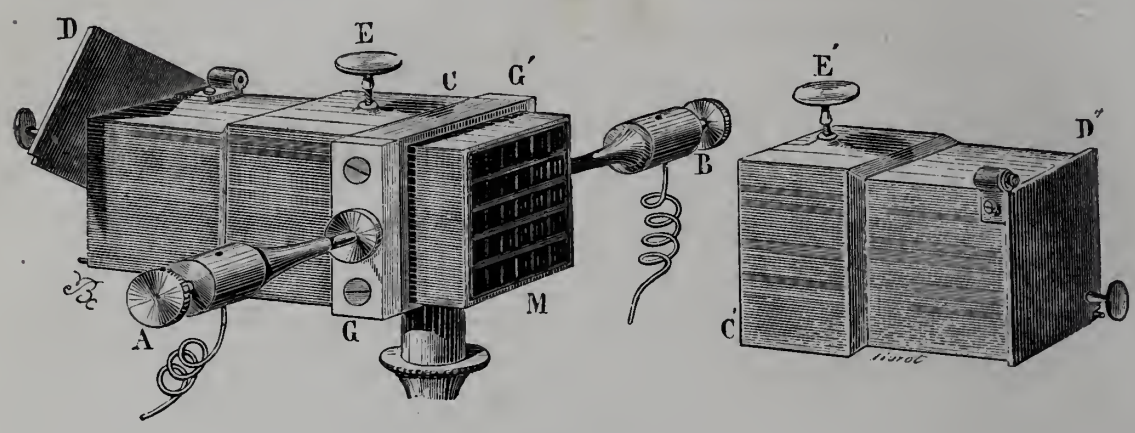



Fig. 41.

fig. 41 se compose ordinairement d'un certain nombre de barreaux de bismuth et d'antimoine, placés parallèlement les uns aux autres et formant un faisceau prismatique M, dont la longueur est de 2 cent. et la section telle que le côté du carré qui la compose est de 12 millim.;

(1) J'ai employé, pour des recherches que le temps ne m'a pas permis de completer, une disposition telle qu'un petit thermomètre à gaz peut devenir très-sensible; elle consiste à construire le réservoir de façon à ce qu'il contienne un fragment de charbon de bois bien recuit; on remplit le thermomètre de gaz acide carbonique, dont le charbon absorbe 30 à 35 volumes, puis on introduit dans la tige du thermomètre une petite colonne d'un liquide qui n'absorbe pas le gaz, comme l'acide sulfurique. Les changements calorifiques font éprouver à cet appareil des variations de volume assez grandes, qui ne sont pas proportionnelles aux différences de température, mais qui peuvent être utiles dans des circonstances déterminées.

(2) *Bibliothèque univ. de Genève*, 1re série, t. 37, p. 119 (1830). *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 48, p. 198.

(3) En 1823, Fourier et Œrsted (*Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. 22, p. 475), avaient eu l'idée de construire des piles thermo-électriques avec des barreaux de bismuth et d'antimoine soudés bout à bout; ces piles n'eurent aucune application.

En 1826, M. Becquerel (*Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. 33, p. 371) a fait usage des courants thermo-électriques pour déterminer la température soit des flammes, soit des fourneaux, et plus tard celle des parties intérieures des animaux, ainsi que celle du sol à diverses profondeurs.

Nobili et Melloni, en 1830 (voir la citation précédente), ont fait usage des piles thermo-électriques, ainsi que des principes précédents, pour l'étude de la chaleur rayonnante.

les deux faces terminales sont noircies. Les barreaux de bismuth qui se succèdent alternativement avec ceux d'antimoine sont soudés à leurs extrémités de deux en deux, et séparés dans toute leur longueur par du papier ou une autre substance isolante très-mince. Au premier et au dernier barreau sont soudés des fils de cuivre qui viennent aboutir à l'une des chevilles A et B de même métal, passant à travers un morceau d'ivoire fixé sur l'anneau GG'. L'intervalle compris entre cet anneau et la pile est rempli de matière isolante. Les extrémités libres de ces deux fils sont mises en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur indiquant, par les déviations de l'aiguille aimantée, si la température d'une des faces de la pile s'élève ou s'abaisse par rapport à celle de l'autre face. En effet, une des faces est formée de toutes les soudures de rang pair, l'autre de celles de rang impair.

A l'aide de tubes de cuivre CD, C'D', on garantit les faces de la pile des rayonnements latéraux, et les rayons venant directement sur un des côtés de la pile agissent seuls. C'est en disposant cet appareil sur une règle divisée qui porte les sources lumineuses, les écrans, les réflecteurs, etc., destinés aux expériences que l'on a en vue d'exécuter, que l'on a pu étudier les différentes circonstances du rayonnement de la chaleur.

J'ai montré (1) comment on pouvait substituer au bismuth et à l'antimoine, dans les piles, des alliages dont le pouvoir thermo-électrique est supérieur à celui de ces métaux et avoir une sensibilité plus grande. Au lieu de bismuth il est préférable d'employer un alliage composé de dix parties de bismuth et de une d'antimoine, alliage dont la force électromotrice est supérieure à celle du bismuth et qui présente une régularité remarquable dans la manifestation des effets thermo-électriques.

Au lieu d'antimoine, il y aurait avantage à se servir de tellure; mais cette matière étant très-rare, on peut avoir recours à un alliage d'antimoine et de cadmium à équivalents égaux. Cet alliage est plus cassant que l'antimoine. Mais en prenant celui qui renferme une quantité de bismuth comprise entre $\frac{1}{20}$ et $\frac{1}{10}$ de son poids, on le rend assez résistant. Celui que je conseille est formé de :

$$\left.\begin{array}{l}\text{Antimoine } 806\\ \text{Cadmium } 696\end{array}\right\}\text{équivalents chimiques égaux.}$$

Bismuth entre $\frac{1}{20}$ et $\frac{1}{10}$ en poids du mélange précédent.

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 8, p. 385 (1866). — *Ann. du Conservatoire impérial des arts et métiers*, t. 6, p. 593.

On fond d'abord l'antimoine (1) dans un creuset ; on ajoute ensuite le cadmium et le bismuth, le bain métallique étant couvert d'une légère couche de charbon pulvérisé; puis on coule l'alliage aussitôt que la fusion est opérée.

Les couples formés avec les alliages précédents ont une force électromotrice plusieurs fois aussi considérables que les couples bismuth antimoine; aussi les piles construites de cette manière sont-elles beaucoup plus sensible spour les effets de rayonnement que les piles ordinaires.

Quand on veut étudier le rayonnement calorifique d'un faisceau de rayons d'une petite épaisseur, comme par exemple lorsqu'il s'agit de la comparaison des effets des différentes parties du spectre solaire, on forme alors une pile avec huit ou dix couples disposés sur un seul rang, de manière à présenter une ligne d'une longueur de 12 à 15 millim. sur une largeur égale à l'épaisseur des barreaux; en outre, un écran rectiligne placé en avant de la pile limite la largeur du faisceau actif.

# CHAPITRE II.

## Analyse par réfraction des rayons calorifiques.

### § 1. *Spectre calorifique.*

On a vu dans le livre Ier du premier volume, page 29, qu'en 1800 William Herschell (2) découvrit que les rayons les moins réfrangibles du spectre solaire, les rayons rouges, donnent une élévation de température plus grande que les rayons bleus, et même qu'en dehors du rouge, dans la partie invisible du spectre moins déviée que le rouge, le thermomètre indique encore une élévation de température. Un faisceau de rayons solaires contient donc des rayons de moindre réfrangibilité que les rayons visibles, que l'on a nommés rayons obscurs, et dont le pou-

(1) L'antimoine doit être aussi pur que possible. Quand on se sert de celui du commerce, il faut le pulvériser et le fondre à deux reprises aux moitié ou trois quarts de son poids d'oxyde d'antimoine.

(2) *Philosophical transactions*, t. 90 (1800).

voir calorifique est très-marqué; en se servant même de prismes en verre, le maximum d'action calorifique est placé à l'extrémité du rouge en dehors de la partie visible.

Seebeck (1), en répétant les expériences d'Herschell, examina l'influence de la nature du prisme sur la position du maximum de chaleur, et, en se servant de prismes solides en verre et de prismes à eau, il trouva que le maximum de chaleur pouvait se déplacer et venir jusque dans le jaune. Mais ces expériences ayant été faites à l'aide d'un faisceau de rayons solaires d'un certain diamètre, le spectre n'était pas épuré et contenait dans une même partie, par superposition, des rayons de réfrangibilité inégale.

Melloni, dont les recherches ont puissamment contribué à établir les lois du rayonnement de la chaleur et l'identité des rayonnements lumineux et calorifiques, chercha à vérifier le fait annoncé par Seebeck en opérant avec un faisceau de rayons solaires pénétrant par une fente rectiligne de peu d'épaisseur d'un volet de la chambre noire, fente qui était parallèle à l'arête des prismes. Ayant trouvé que le sel gemme était à peu près transparent pour la chaleur, il opéra avec différents prismes faits avec cette substance (2), et trouva une plus grande étendue de rayons calorifiques invisibles qu'Herschell ne l'avait observé; d'un autre côté, il observa que le maximum d'action était en dehors du rouge, à une distance de cette extrémité au moins égale à celle qui sépare le rouge du bleu vert. Il montra qu'en opérant avec des prismes de différente nature, le maximum d'action se déplaçait et se rapprochait du rouge d'autant plus que la matière des prismes agissait plus vivement, par absorption, sur les rayons invisibles moins réfrangibles que le rouge, et il reconnut que jamais ce maximum ne pénétrait dans le rouge et jusqu'au jaune.

On conçoit en effet que si tous les prismes sont incolores, c'est-à-dire s'ils sont transparents pour les rayons compris entre les réfrangibilités rouges et violettes, on doit toujours observer des effets calorifiques proportionnels dans les mêmes parties du spectre entre ces limites de réfrangibilité, et le spectre calorifique depuis le rouge jusqu'au violet doit conserver sa distribution calorifique comme il conserve sa distribution lumineuse; il n'y a donc qu'une différence dans la dispersion suivant la nature des prismes. Mais comme les sub-

(1) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1819.

(2) *Journal de l'Institut*, tome I^er^, page 212, n° 25. *Biblioth. univ. de Genève*, 2^e^ série, t. 49 (1844).

tances qui composent les prismes agissent par absorption d'une manière très-inégale sur les rayons obscurs moins réfrangibles que le rouge, cette partie obscure du spectre a une étendue et une composition bien différentes, suivant les diverses substances, et comme on va l'indiquer plus loin. Ainsi le déplacement du maximum calorifique observé par Seebeck dans la partie visible du spectre, tenait à la superposition de plusieurs images prismatiques produites par un défaut de pureté de ces images.

Plusieurs physiciens depuis cette époque ont indiqué quelle est la répartition de la chaleur dans le spectre solaire; parmi les recherches qui ont été faites on peut citer celles de M. Franz (1), en se servant de prismes de flint glass et celles de M. Muller (2) en faisant usage de prismes de sel gemme ainsi que de prismes de crown. Ces physiciens ont opéré à l'aide d'un spectre solaire ne présentant pas les raies noires, car l'effet thermique serait trop faible pour être appréciable dans les différents rayons; on forme alors un spectre par un faisceau de quelque épaisseur, et l'on indique la position approximative des raies d'après la place des couleurs.

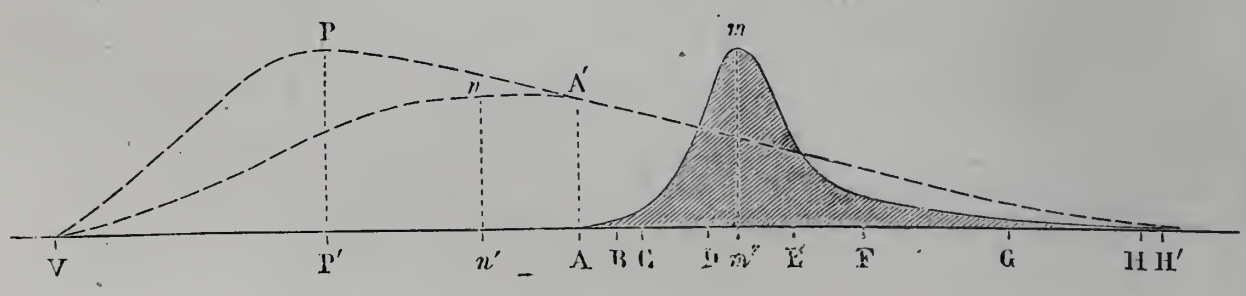



Fig. 42.

La fig. 42 représente la distribution de la chaleur et de la lumière dans le spectre solaire. Les lettres A, B... F. H, indiquent les place des raies noires de Fraünhoffer portant ces dénominations; en A est l'extrême rouge, en F le commencement du bleu, en HH″ l'extrêmité du violet visible. La courbe A*m*H donne la distribution de l'intensité lumineuse d'après Fraünhoffer : au moyen d'un photomètre très-simple, il a indiqué dans son premier mémoire cité tome Ier, livre 4, page 130, la mesure des intensités des différentes parties du spectre, abstraction faite des couleurs, et ces intensités ont donné les valeurs des ordonnées

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 101, p. 46 (1857). — *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 51, p. 488.

(2) *Ann. de Poggend.*, t. 105. — Muller, *Traité de physique*, 1863, t. 2, p. 743.

qui ont servi à construire la courbe. Ces mesures ne sont que bien approximatives, et ne peuvent guère donner que des indications en plus ou en moins; on en verra les motifs quand nous parlerons des sensations produites sur la rétine. On reconnaît néanmoins, d'après ces évaluations, que le maximum de lumière se trouve en *m* dans le jaune vert à côté de la raie D du jaune.

La courbe V P H représente les effets calorifiques observés par M. Muller avec un prisme de sel gemme. Les ordonnées ont été prises comme proportionnelles aux déviations du galvanomètre indiquant l'intensité du courant thermo-électrique de l'appareil employé; elles ne sont donc pas proportionnelles aux effets thermométriques des rayons, mais elles indiquent le plus ou le moins d'effet produit par eux. On a supposé aussi que l'ordonnée maximum PP′ était égale à la longueur *mm′* qui représente l'effet lumineux maximum. On voit que l'étendue de la partie invisible du spectre AV est au moins égale à celle de la partie visible AB; en outre, le maximum d'action est situé en PP′, à une distance de A à peu près égale à celle de A F, comme Melloni l'avait déjà observé.

La courbe V*n*A′H′ représente l'effet observé avec un prisme de crown; on voit que jusque vers le rouge extrême, entre H et A, les deux courbes précédentes se confondent; mais à partir de A les ordonnées sont inférieures à celles de la courbe VP, ce qui montre que le verre agit par absorption sur une partie des rayons obscurs, et cela d'autant plus que les rayons sont moins réfrangibles. Le maximum d'action a lieu en *n*, plus près de A que n'était P.

Ces courbes n'ayant été tracées que par un petit nombre de points ne sont qu'approximatives; d'un autre côté, comme les spectres qui ont servi aux expériences étaient produits au moyen d'un faisceau d'une certaine épaisseur, les rayons différemment réfrangibles n'étaient pas parfaitement séparés. Des expériences faites avec des appareils plus sensibles pourraient donner des résultats plus précis; mais celles-ci montrent néanmoins comment l'absorption a lieu dans la partie la moins réfrangible du spectre.

M. Tyndall (1), en opérant avec l'arc voltaïque comme source de rayonnement et à l'aide d'un prisme de sel gemme, a donné une courbe

(1) Tyndall, *On radiation*, etc., lecture faite le 16 mai 1865 à Cambridge. *Philosophical transactions*, t. 156, p. 1 (novemb. 1865).

qui représente la distribution calorifique dans la partie visible et dans la partie moins réfrangible que le rouge prismatique. Cette dernière partie s'étend plus loin que dans les figures précédentes, ce qui montre que probablement l'atmosphère agit par absorption sur des rayons très-peu réfrangibles, qui ne peuvent être observés dans le spectre solaire mais qui sont appréciables dans le spectre des rayons de l'arc voltaïque. En évaluant l'action calorifique comprise entre les limites extrêmes de réfrangibilité des rayons visibles de l'arc voltaïque, c'est-à-dire entre les limites A et H, et en déterminant celle de tous les rayons invisibles moins réfrangibles que le rouge, il a estimé cette dernière comme étant neuf fois plus forte que la précédente. Ainsi les rayons obscurs entreraient en bien plus forte proportion dans le faisceau émané de l'arc voltaïque que les rayons de la partie lumineuse de l'image du spectre.

On a dit plus haut que dans les spectres formés par des faisceaux étroits et présentant toutes les raies, les effets calorifiques sur la pile thermoélectrique étaient à peine sensibles; cela explique pour quel motif on n'a pu observer des espaces correspondant aux raies noires, car là où se trouvent des raies obscures, les effets calorifiques doivent être nuls. On a vu, tome I^er^, page 141, à propos du spectre infrarouge, quels étaient les moyens d'observation qui pourraient être employés et comment on avait pu dans quelques parties distinguer des espaces obscurs correspondant à des raies noires.

### § 2. *Action des écrans sur le rayonnement calorifique. Substances diathermanes. Écrans incolores et colorés, solides, liquides et gazeux.*

Les résultats qui viennent d'être exposés montrent que la chaleur rayonnante n'est pas plus simple ni plus homogène que la lumière, et l'on est conduit à admettre des rayons de chaleur de propriétés diverses, comme on admet des rayons lumineux différemment colorés. C'est la température plus ou moins élevée que possède une source calorifique qui donne à celle-ci la faculté d'émettre des rayons plus ou moins réfrangibles; mais on ne connaît pas la relation qui lie la réfrangibilité des rayons émis avec la température à laquelle leur émission commence.

Les corps qui se laissent traverser par la chaleur rayonnante sont nommés corps diathermanes, comme on nomme corps diaphanes ou transparents ceux qui transmettent librement les rayons lumineux; on appelle athermanes les corps qui arrêtent plus ou moins les rayons ca-

lorifiques, comme on appelle translucides ou opaques ceux qui absorbent la lumière en partie ou en totalité. Si l'on observe que les sources colorifiques à basse température émettent des rayons dont la réfrangibilité est inférieure à celles des rayons lumineux rouges, il s'ensuit que des substances peuvent absorber inégalement ces rayons ou être inégalement diathermanes, et laisser passer la même quantité relative des rayons compris entre les réfrangibilités A et H, c'est-à-dire être également transparentes pour la lumière. C'est ainsi que dans les expériences sur le spectre, dont il a été question dans le paragraphe précédent, le verre et l'eau, substances blanches et transparentes sous une faible épaisseur, arrêtent en partie les rayons moins réfrangibles que les rayons rouges, lesquels rayons traversent au contraire aisément le sel gemme qui est alors transparent pour la chaleur comme pour la lumière.

En général, les rayons calorifiques sont d'autant plus facilement absorbables qu'ils sont moins réfrangibles, c'est-à-dire qu'ils sont émis à de plus basses températures. Melloni (1) pour le démontrer a étudié les sources de chaleur les plus différentes et les plus constantes qu'il a pu trouver; ce sont 1° le rayonnement solaire ; 2° une lampe Locatelli, c'est-à-dire dont la mèche brûle sans être environnée d'une cheminée en verre; 3° une spirale de platine placée au-dessus de la mèche d'une lampe à alcool ; elle y devient incandescente et se maintient au rouge quand on éteint la lampe; 4° une lame de cuivre noirci, chauffée au-dessous du rouge dans la flamme d'une lampe à alcool et par conséquent environ à 400° ; 5° un cube plein d'eau toujours maintenu à l'ébullition, c'est-à-dire une source calorifique à 100°.

Il a disposé la pile thermo-électrique de façon à recevoir un faisceau de rayons émanés de l'une de ces sources sur une des faces de la pile, et au moyen d'un galvanomètre donnant, à l'aide d'une table, l'intensité du courant produit, il a pu déterminer l'intensité calorifique de ce faisceau; en interposant alors sur la route des rayons un écran à faces parallèles formé par une substance diathermane, il a pu évaluer l'intensité du faisceau transmis au travers de cet écran et connaître l'absorption éprouvée par le faisceau. En opérant successivement sur les différentes sources et avec diverses matières solides incolores, il a obtenu des résultats parmi lesquels on peut citer les suivants :

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 53, p. 5. — Id., t. 55, p. 337. — Id. t. 72, p. 41.

| NOMS DES SUBSTANCES. | INTENSITÉ DES RAYONS TRANSMIS. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | LAMPE Locatelli. | PLATINE incandescent. | CUIVRE à 400°. | CUBE à 100°. |
| Sans écran | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Sel gemme | 92 | 92 | 92 | 92 |
| Chaux fluatée blanche | 78 | 69 | 42 | 33 |
| Spath d'Islande | 39 | 28 | 6 | 0 |
| Verre de glace | 39 | 24 | 6 | 0 |
| Cristal de roche | 38 | 28 | 6 | 0 |
| Chaux sulfatée blanche | 14 | 5 | 0 | 0 |
| Alun | 9 | 2 | 0 | 0 |
| Glace (eau congelée) | 6 | 0 | 0 | 0 |

Dans chaque série d'expériences on représente par 100 l'intensité des rayons incidents, c'est-à-dire que l'on rapporte les effets observés à celui qui est produit sans l'interposition d'un écran. On reconnaît que les rayons émis par le cube à 100° sont plus facilement absorbables que ceux des autres sources, car ils traversent seulement le sel gemme et la chaux fluatée, et sont absorbés en totalité par les autres écrans, tandis que les rayons émis par le cuivre à 400° traversent le spath d'Islande, le verre et le cristal de roche. Bien plus, le faisceau de rayons donné par le platine incandescent les traverse tous à l'exception de la glace, et celui qui est émis par la lampe Locatelli est transmis par tous les écrans avec une intensité encore plus grande. Ainsi, à mesure que la température de la source est plus élevée, les rayons traversent plus facilement les corps transparents et incolores.

On reconnaît en outre que, parmi ces corps, le sel gemme laisse passer la même proportion des divers faisceaux incidents, 92 pour 100 ; on doit en conclure qu'il est diathermane, c'est-à-dire transparent pour les divers rayons de ces sources calorifiques, et que la proportion de 8 p. 100, qui est la différence entre l'intensité des faisceaux incidents et transmis, indique la perte due aux réflexions à l'entrée et à la sortie de l'écran.

La transparence calorifique du sel gemme, permet d'utiliser ce corps pour former des prismes et des lentilles destinés aux recherches sur le rayonnement calorifique, cette substance solide étant celle qui possède au plus haut degré cette propriété; on avait pensé que tous les rayons,

quelle que fût la température de la source, traversaient cette matière sans éprouver d'autre absorption que celle qui résulte de la réflexion régulière ou irrégulière du faisceau incident sur les surfaces d'entrée et de sortie, mais MM. de la Provostaye et Desains (1) ont montré que les faisceaux des rayons calorifiques émanés de sources à température très-basse étaient partiellement arrêtés par le sel gemme. Dès lors cette substance peut agir comme les autres corps; elle éteint quelques-uns des rayons les moins réfrangibles, et dans l'étude du spectre calorifique obtenu avec un prisme fait avec cette matière, il doit y avoir des rayons obscurs encore moins réfrangibles que ceux qui ont été examinés et dont on n'a pu observer les effets. On ne connaît donc pas de corps tout à fait diathermane pour toute espèce de rayons, et si un tel corps existait, il ne s'échaufferait pas par rayonnement et ne pourrait varier de température qu'en s'échauffant ou se refroidissant par voie de conductibilité.

Quand une substance diathermane absorbe une partie des rayons incidents, si l'on ne tient pas compte de la perte qui résulte de la réflexion, cette absorption donne lieu à l'échauffement de la matière, qui peut alors agir à son tour comme source calorifique. On sait que les différentes recherches faites sur la chaleur rayonnante par Leslie, Rumfort, Dulong, de la Provostaye et Desains, etc..., ont montré l'égalité qui existe entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un corps pour des rayons émanés d'une même source calorifique; il en résulte que les corps qui s'échauffent le plus deviennent à température égale les sources les plus actives. Ce principe étendu à la lumière, et ainsi qu'on l'a expliqué dans le tome Ier, page 162, a permis à M. Kirchhoff de rendre compte du phénomène des raies du spectre solaire; il ne sera pas donné plus de détails sur ce sujet, n'ayant parlé des effets produits par les écrans que pour montrer comment on pouvait distinguer dans le rayonnement calorifique les élements différemment réfrangibles ou absorbables qui le constituent.

Si au lieu de se servir d'écrans incolores on emploie des écrans colorés, comme dans les recherches de MM. Melloni, Masson et Jamin (2), Franz (3), indépendamment de l'action que les écrans

(1) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 36, p. 84.

(2) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 31, p. 14.

(3) *Ann. de Poggend.*, t. 94, p. 337, et t. 101, p. 46. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 46, p. 111, et t. 51, p. 488.

exercent sur les rayons infra-rouges, ainsi que les précédents ils agissent en même temps par absorption sur des rayons dont la réfrangibilité est comprise entre les limites du spectre solaire A et H. En isolant alors chaque partie d'une réfrangibilité bien déterminée d'un spectre, et en étudiant l'effet de ces écrans sur la lumière et sur ceux qui agissent sur les thermoscopes, on trouve toujours que dans les parties correspondantes l'extinction et la transmission de la lumière suivent les mêmes lois que l'extinction et la transmission de la chaleur, conséquence nécessaire de l'identité de ces deux agents.

Quant aux rayons compris dans la partie infra-rouge, ils sont absorbés plus ou moins, selon la nature des corps, comme lorsqu'on a fait usage des écrans incolores; M. Franz a reconnu qu'en général les liquides colorés en bleu absorbent ces rayons calorifiques invisibles, tandis que ceux colorés en rouge les laissaient passer; le chromate de potasse, par exemple, est diathermane pour ces rayons.

Melloni avait trouvé, dès ses premières recherches, que la teinte plus ou moins foncée de certains corps n'apporte aucune modification dans la manière dont les rayons obscurs sont transmis; ainsi le quartz enfumé a la même diathermanéité que le quartz limpide; de plus, le noir de fumée en couche mince, placé sur une plaque de sel gemme ou d'un autre corps (1), laisse également bien traverser ces rayons et ne porte obstacle qu'à la transmission des rayons plus réfrangibles qui sont compris entre les réfrangibilités A et H du spectre solaire. Ce fait est remarquable, et montre que le carbone n'a qu'un faible pouvoir de diffusion. On a déjà parlé de ces effets dans les préliminaires de ce volume, page 11.

Les liquides incolores ou colorés se comportent comme les corps solides; les uns sont très-diathermanes comme le sulfure de carbone, d'autres comme l'eau sont au contraire très-absorbants. M. Desains (2) a constaté que le chlorure de carbone liquide, à égalité d'épaisseur, est plus facilement traversé par la chaleur obscure que le sulfure de carbone lui-même. Le chloroforme présente une diathermanéité assez grande, mais moindre. La benzine et la glycérine au contraire sont des liquides très-absorbants. Si l'on rapproche ces résultats du pouvoir absorbant que l'eau exerce, on pourrait peut-être en conclure qu'en général l'hydrogène apporte un pouvoir absorbant assez grand dans les combinaisons dont il fait partie.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1839, t. 9, p. 315.
(2) Id., t. 65, p. 407.

Le brome, qui sous une petite épaisseur est pour ainsi dire opaque, se laisse traverser par les rayons calorifiques infra-rouges comme le quartz enfumé. Une dissolution concentrée d'iode dans le sulfure de carbone offre un autre exemple de ce genre d'action ; ce liquide, d'un rouge très-foncé sous une faible épaisseur, et dont une couche plus épaisse ne laisse traverser aucun rayon lumineux, laisse cependant passer presque en totalité la partie infra-rouge du spectre. On verra le parti que M. Tyndall a pu en tirer pour des expériences dont les résultats seront cités plus loin.

Le gaz et les vapeurs agissent par absorption sur le rayonnement calorifique comme les solides et les liquides ; mais la quantité de matière qui se trouve sur la route des rayons étant plus petite, il faut des dispositions particulières pour étudier les effets produits. MM. Tyndall et Magnus se sont particulièrement occupés de ces questions (1).

M. Tyndall, dans plusieurs séries d'expériences, a fait usage d'une source calorifique obscure (cuivre chauffé au-dessous du rouge à 400° environ) et de la disposition suivante : un tube horizontal, terminé par deux faces en sel gemme, est placé devant une des faces d'une pile thermo-électrique, de façon à ce que les rayons émanés de la source passent par le tube avant de frapper la face de la pile ; une autre source calorifique semblable, servant de source de comparaison, agit sur l'autre face de la pile, de sorte que si les deux sources sont égales, l'aiguille du galvanomètre reste à 0. Si l'un ou l'autre flux calorifique l'emporte, aussitôt l'aiguille est déviée en raison de la différence de température, et l'on peut conclure des intensités du courant électrique déduites de ces déviations les intensités relatives des deux faisceaux calorifiques. On raréfie l'air dans le tube, puis on y introduit successivement différents gaz, mais sous une pression de 2 centim. 5 de mercure, c'est-à-dire ayant $\frac{1}{30}$ de la force élastique de l'air extérieur. Les nombres suivants expriment les quantités relatives de chaleur absorbée par les gaz sous cette faible pression, en prenant pour unité celle absorbée par l'air atmosphérique à la pression ambiante :

| Noms des gaz. | Absorption relative. |
|---|---|
| Air. . . . . | 1 |
| Oxygène. . . . . | 1 |

(1) Tyndall, *Philosoph. transact.*, 1861 et 1862. — *Sur la radiation*, 1865. — Magnus *Ann. de Poggend.*, t. 114. — *Mémoires de l'Acad. de Berlin*, 1862. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 63, 64, 66 et 67; 4e série, t. 3.

| Noms des gaz. | Absorption relative. |
|---|---|
| Azote | 1 |
| Hydrogène | 1 |
| Oxyde de carbone | 750 |
| Acide carbonique | 972 |
| Acide chlorhydrique | 1005 |
| Protoxyde d'azote | 1590 |
| Acide nitreux | 1860 |
| Hydrogène sulfuré | 2100 |
| Ammoniaque | 5460 |
| Gaz oléfiant | 6030 |
| Acide sulfureux | 6480 |

Chacun de ces gaz est transparent pour la lumière, c'est-à-dire que les rayons compris dans les limites du spectre visible les traversent également bien; mais pour les rayons de plus grande longueur d'onde émanés de la source obscure il y a de grandes différences dans les pouvoirs absorbants. Ces différences montrent que les gaz simples se comportent à peu près de même et absorbent peu la chaleur rayonnante; mais les gaz composés ont un pouvoir absorbant considérable, et il semble qu'il soit d'autant plus grand que les gaz sont près de leur changement d'état.

Les vapeurs se comportent de même; en prenant pour unité l'absorption de l'air à la pression ambiante, on a pour les vapeurs placées dans le tube indiqué précédemment, sous la pression de $\frac{1}{60}$ d'atmosphère :

| Noms des vapeurs. | Absorption relative. |
|---|---|
| Sulfure de carbone | 47 |
| Benzine | 136 |
| Éther sulfurique | 440 |
| Éther formique | 548 |
| Éther acétique | 612 |

Chacune de ces vapeurs dégagées dans l'air, devant un corps qui émet des rayons obscurs, intercepte plus ou moins le flux calorifique.

Les parfums répandus dans l'air produisent un effet analogue, bien qu'ils ne s'y trouvent qu'en très-faible quantité. On a cité dans le tableau suivant les résultats observés par M. Tyndall en plaçant dans un cou-

rant d'air passant dans le tube qui forme écran un papier buvard humecté d'une huile essentielle :

| Substances odorantes. | Absorption. |
|---|---|
| Essence de rose. . . . . | 34 |
| Essence de lavande. . . . . | 60 |
| Fleurs de camomille. . . . . | 87 |
| Huile de cassia. . . . . | 100 |
| Essence d'anis. . . . . | 372 |

Ainsi de très-faibles quantités de vapeur contenues dans l'air lui donnent un grand pouvoir d'absorption pour les rayons moins réfrangibles que le rouge prismatique. D'après M. Tyndall, la vapeur d'eau elle-même a un énorme pouvoir absorbant, et l'effet produit par l'atmosphère sur la chaleur solaire doit être rapporté presque en totalité à la vapeur aqueuse, tant son action surpasse celle de l'air sec. En effet, suivant son évaluation, la vapeur d'eau dans les conditions hygrométriques ordinaires a un pouvoir absorbant 200 fois plus grand que celui de l'air dans lequel il est diffusé, ce qui donne pour l'action de la vapeur d'eau comparée à poids égal une valeur plusieurs milliers de fois supérieure à celle de l'air sec.

M. Magnus (1), tout en ayant trouvé pour les pouvoirs absorbants des différents gaz des valeurs qui s'accordent avec les valeurs indiquées plus haut (autant qu'on peut l'espérer, les méthodes d'expérimentation n'étant pas les mêmes), a cependant obtenu pour la vapeur d'eau des résultats différents ; car, d'après ses expériences, l'air humide contenant de la vapeur d'eau transparente ne diffère pas beaucoup de l'air sec, tandis que quand cet air contient de la vapeur vésiculaire, il absorbe facilement la chaleur. Les résultats différents obtenus par M. Tyndall ne proviendraient, suivant lui, que de la condensation de la vapeur d'eau par les parois des appareils ainsi que de l'action exercée par l'eau ainsi condensée sur les rayons calorifiques et sur la pile. Il faut remarquer, cependant, que si l'action excercée par les vapeurs est proportionnelle à celle qu'exercent les mêmes corps à l'état liquide, comme on va le voir ci-après, alors l'eau et la vapeur vésiculaire étant assez fortement absorbantes, la vapeur aqueuse transparente doit l'être également.

(1) *Ann. de Pogg.*, t. 118, p. 575. *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 65, 66 et 67. *Archives des sciences physiques et naturelles*, Genève, nouvelle période, t. 18, p. 50, et 83, t. 20, p. 152, et t. 27, p. 88.

M. Tyndall a trouvé en effet que l'absorption opérée par plusieurs vapeurs est proportionnelle à celle que donnent les mêmes substances à l'état liquide; il a établi ce résultat en montrant que l'ordre d'absorption est le même dans les deux cas, soit que l'on emploie une série de liquides contenus dans des auges, soit les mêmes corps à l'état de vapeur dans le tube dont il a été question plus haut.

M. P. Desains (1) a déterminé directement les pouvoirs absorbants que l'éther ordinaire et l'éther formique à l'état liquide et à l'état de vapeur exercent sur le flux calorifique provenant d'une source obscure à 400° ou bien émané d'une lampe à cheminée en verre, et il a trouvé exactement les mêmes nombres; au lieu d'employer des tubes et des auges formées par des plaques en sel gemme, il a fait usage de lames de spath fluor très-limpide, qui, bien que moins diathermanes que le sel gemme, comme on l'a vu plus haut dans le tableau de la page 30, sont néanmoins très-perméables au rayonnement calorifique (2). Au moyen de ces dispositions, il a pu constater que l'éther, à l'état liquide ou à l'état de vapeur, exerce la même action absorbante sur les rayons calorifiques, pourvu que le nombre des molécules actives que les rayons rencontrent soit le même. En opérant sur le gaz d'éclairage, il a constaté également que dans un tube déterminé un poids constant de ce gaz exerce une action complétement indépendante de la quantité plus ou moins grande d'air qu'on y mêle; on sait que dans ces circonstances le pouvoir absorbant de l'air est si faible qu'on peut le négliger.

On a vu plus haut que l'acide carbonique avait un pouvoir absorbant plus grand pour les rayons obscurs que celui des gaz simples, mais bien moindre que celui des autres gaz composés et plus de six fois moindre que le gaz oléfiant et l'acide sulfureux. M. Tyndall a reconnu que si l'on se sert, comme source calorifique, de la flamme de l'oxyde de carbone dans laquelle l'acide carbonique formé par la combustion est l'agent principal du rayonnement, alors l'acide carbonique est beaucoup plus absorbant pour cette source que les autres gaz et au moins deux fois autant que le gaz oléfiant. Cet effet est analogue à celui que l'on observe dans l'émission de la lumière, et résulte du principe de l'égalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un même corps à égalité de température, car dans cette flamme, l'acide carbonique, étant le corps qui rayonne, donne des rayons qui sont absor-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 64, p. 1086.
(2) Id., t. 65, p. 407.

bés en plus grande abondance par ce corps que par d'autres substances. M. Tyndall a même proposé l'emploi de la flamme de l'oxyde de carbone pour révéler la présence dans l'atmosphère de traces d'acide carbonique. Le rayonnement calorifique de la flamme de l'hydrogène, par la même raison, est presque entièrement arrêté au moyen d'une couche d'eau de quelques millimètres d'épaisseur (1).

### § 3. *Incandescence produite par les rayons calorifiques obscurs.*

L'emploi de la solution d'iode dans le sulfure de carbone, dont on a parlé plus haut page 33, qui lorsqu'elle contient suffisamment d'iode est sensiblement opaque pour la lumière, mais reste perméable aux rayons infra-rouges, a permis à M. Tyndall (2) de concentrer ces rayons obscurs sur une étendue déterminée et d'élever au-dessus du rouge la température des corps qui se trouvent soumis à leur influence. Pour faire cette expérience, il s'est servi, comme source calorifique, d'un arc voltaïque donné par un régulateur photo-électrique; les rayons concentrés par le miroir concave fixé au fond du régulateur traversaient un écran plan terminé par deux plaques minces de verre et contenant la dissolution d'iode, et après ce passage le faisceau convergent ne produisait plus de lumière au foyer, mais était capable d'enflammer en ce point le papier, le charbon et les corps combustibles. Mais ce qui montre que les rayons pouvaient élever la température au-dessus du rouge sans le secours d'aucune action chimique, c'est qu'en tombant sur une lame de platine platinisée, dans le vide ou dans l'air, ils ont élevé celle-ci à l'incandescence et l'ont rendue capable d'émettre des rayons lumineux, c'est-à-dire des rayons d'une réfrangibilité plus grande que celle des rayons incidents (3).

(1) *Ann. de physique et de chimie*, 4e série, t. 3, p. 506.

(2) Tyndall, *Sur la radiation*, 1865. — *Philosoph. transact.*, t. 156, p. 1 (1866) (mém. du 23 nov. 1865).

(3) Je dois faire remarquer qu'il est à ma connaissance que ce sujet, avant 1865, avait déjà attiré l'attention des savants. En effet, lors du concours pour le prix Bordin à décerner en 1864 par l'Académie des sciences de l'Institut de France, et dont j'étais un des juges, un mémoire inscrit sous le n° 1, et portant pour épigraphe « *fiat lux* », avait été déposé au secrétariat le 20 juin 1864. L'auteur proposait de construire de grands miroirs et d'examiner l'effet de la chaleur rayonnante pour observer si l'on ne changerait pas la longueur d'onde des rayons émis par les corps placés au foyer. Le prix ne fut pas décerné et le concours fut prorogé à l'année suivante. (Jugement du concours, décembre 1864; résumé, *Comptes rendus*, tom. 60, p. 289, fév. 1865.)

Ce mémoire, auquel une addition fut faite avant le 29 août 1864, fit partie du concours

Quand on place ainsi le platine au foyer du miroir, on ne tarde pas à distinguer les images des deux charbons, points où l'élévation de température est la plus forte, de sorte que les deux extrémités polaires de ces charbons ont, pour ainsi dire, leur image thermographique qui n'apparaît qu'au moment où le platine est porté à l'incandescence. En opérant de cette manière, l'écran plan de sulfure de carbone iodé absorbant les rayons compris entre les réfrangibilités correspondant aux raies A et H du spectre solaire s'échauffe assez vivement, et l'inflammation du sulfure arrive fréquemment. Pour obvier à cet inconvénient, on fait généralement l'expérience de la manière suivante, comme le représente la figure 43 :

Le régulateur de lumière électrique est en R, et les charbons polaires peuvent être placés au centre de l'appareil. Le miroir en verre argenté M est mobile au moyen de la tige P, de sorte qu'on peut l'avancer ou l'éloigner et faire converger les rayons émanés de l'arc plus ou moins loin en avant de l'appareil. Au lieu d'un écran plan de sulfure de carbone iodé, on met simplement un ballon B rempli de cette dissolution, lequel étant placé à l'orifice de la lanterne fait fonction de lentille et d'écran, et fait converger vers *a* les rayons qui tombent sur sa surface antérieure. En *a* on met les corps combustibles qui doivent recevoir l'action du foyer calorifique.

On peut demander au foyer invisible situé en avant du ballon B ce que l'on obtient d'un foyer ordinaire; le bois, le papier, le fulmi-coton s'enflamment. Mais l'épaisseur du verre du ballon déforme un peu les images, de sorte que l'expérience faite avec le platine platinisé peut ne pas réussir, ce qui n'a pas lieu en opérant avec un écran plan.

de l'année suivante, et voici ce qui est dit dans le rapport de M. Fizeau (*Comptes rendus*, t. 62, p. 486). « Ce travail renferme des considérations étendues et intéressantes sur les « tranformations que les diverses radiations paraissent éprouver dans les phénomènes de « fluorescence, de phosphorescence et d'échauffement par la chaleur rayonnante; phénomènes dans lesquels les nouvelles radiations possèdent en général une réfrangibilité plus « faible que celle des radiations primitives qui leur ont donné naissance.

« L'auteur s'est posé la question de savoir s'il serait possible de réaliser la transformation inverse, c'est-à-dire celle des radiations moins réfrangibles en radiations plus réfrangibles, et il propose plusieurs dispositions expérimentales destinées à résoudre cette « question. Malheureusement le mémoire ne renferme pas de conclusions définitives, et « l'on doit regretter, avec l'auteur, que des circonstances particulières ne lui aient pas « permis de pousser plus loin les recherches. »

L'auteur, M. Akin, qui a publié depuis son mémoire, n'avait fait à cette époque aucune expérience.

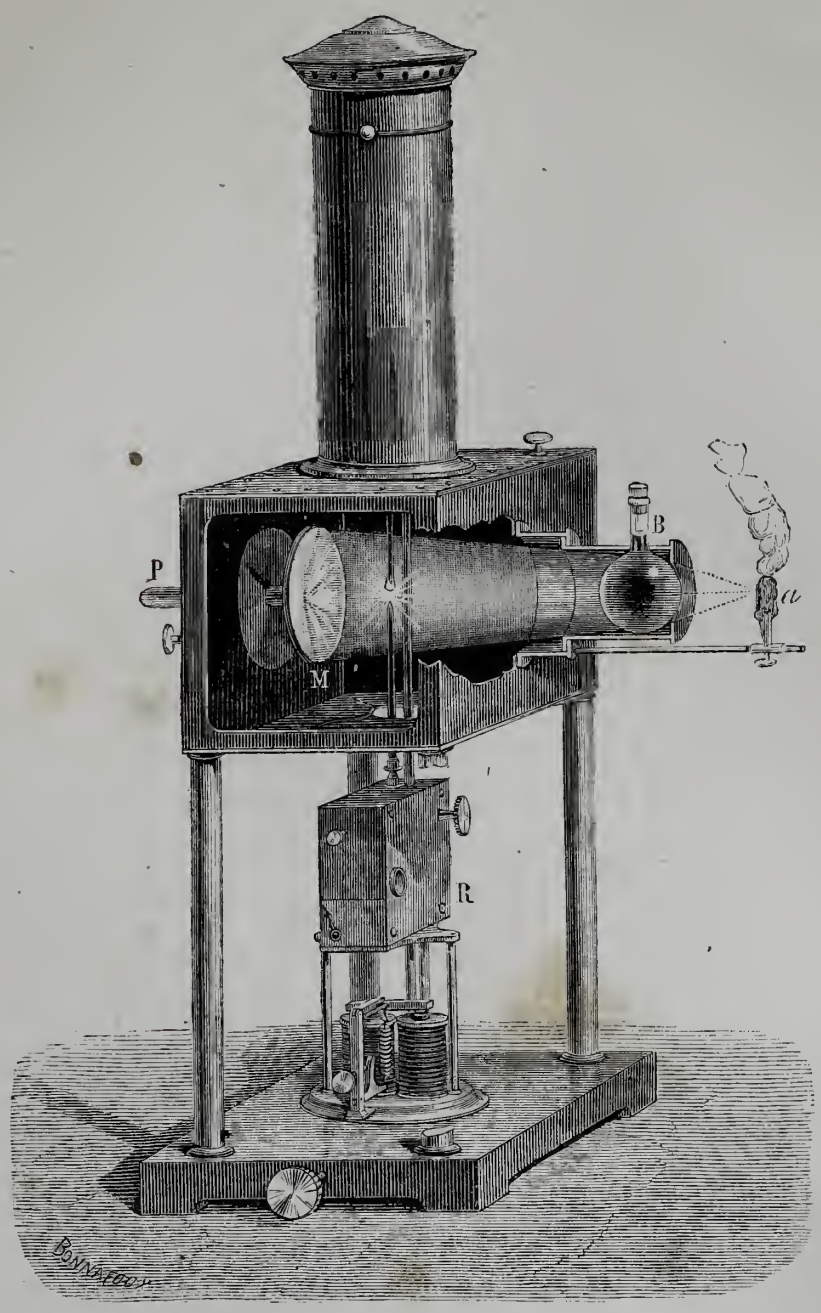



Fig. 43.

M. Tyndall a répété les mêmes expériences avec un verre noir dont la couleur est donnée par le carbone, car on a vu que ce dernier corps est diathermane pour les rayons infra-rouges ; mais il faut des verres noirs qui en couches minces sont rouges, et non pas ceux qui sont alors verts, car ces derniers arrêtent les rayons calorifiques obscurs. Néanmoins, les expériences réussissent mieux avec les écrans plans de sulfure de carbone contenant l'iode en dissolution.

Ces expériences permettent de reconnaître que les rayons infra-rouges, même lorsqu'ils sont concentrés, ne donnent aucune impression

lumineuse sur la rétine; en opérant ainsi on doit se mettre à l'abri de l'échauffement des parties de l'œil qui entourent la rétine. Nous verrons du reste, en parlant des effets physiologiques, que ces rayons sont en partie absorbés par les milieux qui composent l'organe de la vision, et qu'en deçà de la longueur d'onde correspondante au rouge extrême, les rayons émanés des sources lumineuses n'exercent plus d'effet sur nos yeux.

M. Tyndall a donné le nom de phénomènes de calorescence à ces phénomènes qui mettent en évidence un changement de réfrangibilité entre les rayons reçus par les corps et les rayons émis; c'est-à-dire qui indiquent une émission de vibrations rapides succédant à une absorption de vibrations plus lentes.

En admettant, comme on le fait habituellement, que les pouvoirs émissifs et absorbants d'un corps sont égaux pour des rayons d'une même température, on est conduit à cette conclusion, qu'une source calorifique maintenue à une température déterminée ne peut produire sur ce corps une élévation de température supérieure à celle-ci, même en concentrant sur lui la chaleur émise par la source. Ainsi, avec des rayons émis par une source à 100°, on ne pourrait pas dépasser cette limite de température. Mais si les pouvoirs émissifs et absorbants ne sont pas égaux, ce qui peut dépendre de l'état et de la nature du corps qui reçoit l'action calorifique ainsi que de l'intensité des rayons incidents, alors des rayons calorifiques dont l'intensité serait suffisante pourraient donner une élévation de température supérieure à celle de la source qui les émet; dans ce cas, avec une très-grande quantité de rayons provenant d'une source à 100°, mais répartis sur une petite étendue, on devrait dépasser cette limite de température.

Pour concevoir la possibilité de ce résultat, il faut remarquer, comme on l'a déjà vu page 21, que si la température d'une source calorifique augmente, non-seulement des rayons de plus en plus réfrangibles viennent s'ajouter à ceux qui sont émis à plus basse température, mais encore ces premiers rayons de faible réfrangibilité augmentent graduellement d'intensité. Or, d'après ce qui a été dit tome I^er^, page 70 et suivantes, puisque l'intensité de chaque groupe de ces rayons croît d'une manière extrêmement rapide avec la température de la source, il peut se faire qu'à la température si élevée de l'arc voltaïque les rayons infra-rouges aient une telle intensité qu'ils puissent donner lieu au phénomène dont il est question ici; tandis qu'avec

des sources ayant relativement des basses températures, c'est-à-dire à 100 ou 200°, il est possible que l'intensité des rayons émis soit trop faible pour que, même concentrés, on puisse dépasser d'une manière sensible la température de la source. Ce serait dans ces conditions que la transformation des vibrations pourrait avoir lieu, et non pas par un changement immédiat dans la vitesse des mouvements vibratoires; en d'autres termes, les corps recevraient une impression de la part du rayonnement calorifique et émettraient ensuite des rayons d'une autre longueur d'onde que ceux qui auraient agi sur eux, contrairement aux effets que présentent les phénomènes de phosphorescence étudiés dans la première partie (voir t. 1, pages 302 et 320), puisque les corps phosphorescents émettent en général des rayons moins réfrangibles que les rayons qui les excitent. On comprend tout l'intérêt que présente ce sujet d'étude, que les recherches ultérieures sur la chaleur rayonnante ne peut manquer d'élucider.

### § 4. *Quantité de chaleur émanée du soleil. Action exercée par l'atmosphère terrestre.*

L'atmosphère joue un rôle important dans la répartition de la chaleur rayonnante sur le globe; cette enveloppe transparente absorbe une partie des rayons émanés du soleil, et tempère l'action de la chaleur par cette absorption, car elle empêche que la portion de la terre privée momentanément de la présence du soleil pendant la nuit, ne soit exposée à un froid considérable par suite du rayonnement de la terre dans l'espace.

D'après ce qui a été dit plus haut, la vapeur d'eau est en grande partie cause de l'absorption de la chaleur lors de la transmission des rayons solaires au travers de l'atmosphère; car, malgré sa faible proportion dans les masses atmosphériques, M. Tyndall admet qu'elle a un pouvoir absorbant au moins deux cents fois plus fort que celui de l'air dans lequel elle est diffusée.

On a cherché, pour remonter à la quantité de chaleur émanée du soleil, quelle était la partie du rayonnement ainsi absorbée par l'atmosphère. Plusieurs physiciens se sont occupés de ce sujet, notamment MM. de Saussure, J. Herschell, Pouillet, Forbes et Quetelet; ils ont fait usage d'actinomètres de dispositions diverses. M. Pouillet (1) a employé

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 7, p. 24, 1838. Becquerel et Ed. Becquerel, *Physique terrestre et météorologie*, p. 48.

les appareils qu'il a nommés pyrhéliomètres, et qui sont formés de vases en argent à minces parois, noircis, remplis d'eau, orientés de façon à recevoir les rayons du soleil, et qui, fonctionnant comme calorimètres, donnent par le changement de température de l'eau la quantité de chaleur reçue par l'appareil pendant un temps déterminé.

En évaluant les élévations de température aux diverses heures de la journée, lorsque les rayons solaires ont agi pendant le même temps, pendant cinq minutes, par exemple, on trouve des nombres forts différents pour les quantités de chaleur absorbées, en raison de l'épaisseur inégale de l'atmosphère traversée par les rayons. Bouguer (1) a admis que l'intensité des rayons qui traversent différentes couches d'air peut être représentée par les ordonnées d'une courbe logarithmique dont les abscisses indiquent les épaisseurs de ces couches. L'on a d'après cette hypothèse :

$$t = A\,p^e,$$

$t$ désignant la température, $e$ l'épaisseur de la couche atmosphérique calculée d'après une formule approximative assez simple, A et $p$ deux constantes.

La première constante A est indépendante de l'état de l'atmosphère; la seconde $p$, varie le même jour et d'un jour à l'autre suivant la sérénité de l'air. A est donc la constante solaire contenant, comme élément, la puissance calorifique du soleil, et $p$ la constante atmosphérique renfermant le pouvoir de transmission variable dont est douée l'atmosphère.

M. Pouillet, à Paris, d'après cette loi, a trouvé pour $p$ une valeur variable entre 0,72 et 0,79. M. Quetelet (2) a obtenu à Bruxelles le nombre 0,62, et M. Forbes (3), en Suisse, est arrivé au nombre 0,685. Voici du reste quelques-unes des valeurs de $p$ données par différents observateurs :

| | |
|---|---|
| Bouguer. . . . . | 0,812 |
| Lambert. . . . . | 0,589 |
| Leslie. . . . . | 0,750 |

(1) Bouguer, *Traité d'optique sur la gradation de la lumière;* Paris, 1729, section 3, p. 63.

(2) Du rayonnement solaire. *Annuaire météorologique de la France* pour 1850, p. 143.

(3) *Philosoph. transact.*, t. 132, 1842.

| | |
|---|---|
| Pouillet. . . . . | de 0,72 à 0,790 |
| Forbes. . . . . | 0,685 |
| Quetelet. . . . . | 0,620 |

En représentant par 1 l'intensité d'un rayon émané du soleil et tombant sur l'atmosphère, dont l'épaisseur reste la même et est égale à 1, alors la quantité absorbée par celle-ci est $1-p$. Il résulte des nombres précédents que dans le trajet vertical des rayons venant du zénith, l'atmosphère absorbe entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{4}$ de la chaleur incidente; d'après M. Quetelet, dans nos climats c'est le nombre $\frac{1}{3}$ qui doit être adopté.

On a supposé, dans le raisonnement précédent, que les rayons incidents éprouvaient les mêmes actions de la part de l'atmosphère et diminuaient d'intensité suivant la même loi; mais, ainsi qu'on l'a vu dans les paragraphes antérieurs, les éléments différemment réfrangibles dont ils se composent sont différemment absorbables, et dès lors, tout en supposant qu'ils subissent la même loi d'absorption, ce qui n'est pas prouvé, les coefficients ne doivent pas être les mêmes pour chacun d'eux. Indépendemment de cela, il est probable que les rayons de diverses réfrangibilités ne sont pas absorbés de la même manière, et qu'il se produit un phénomène analogue à celui qui donne lieu aux raies ou bandes du spectre solaire; tel est peut-être le motif des différences observées dans divers lieux, selon l'état de l'atmosphère.

Si l'on cherche à se faire une idée de la quantité totale de chaleur reçue par la terre et de la portion absorbée par l'atmosphère, on trouve, d'après les recherches de M. Pouillet, que la quantité totale de chaleur que le soleil envoie par minute, sur chaque centimètre carré de la surface de la terre est représentée par

1,7633 calories,

si l'air atmophérique n'absorbait aucun des rayons incidents; mais en raison de cette absorption, à chaque instant sur l'hémisphère éclairé par le soleil, la partie de la chaleur qui arrive au sol est comprise entre 0,5 et 0,6 de la quantité de chaleur incidente, et celle qui est absorbée est comprise entre 0,5 et 0,4. La terre ne reçoit donc environ, par suite de la présence de l'atmosphère, que la moitié à peu près de la chaleur émanée du soleil.

Si l'on évalue cette quantité de chaleur en glace fondue, on trouve que sans la présence de l'atmosphère la quantité de chaleur que

nous envoie le soleil en un an serait capable de fondre une couche de glace de 30 mètres répandue sur toute la surface du globe; mais comme en réalité, par suite de la présence de l'atmosphère, il n'y a environ que la moitié de cette chaleur reçue sur le globe, alors cette quantité de chaleur qui nous arrive annuellement est capable seulement de fondre une couche de glace de 15 mètres d'épaisseur répartie uniformément sur la terre.

Ces mêmes résultats donnent une évaluation approchée de la quantité de chaleur émanée à chaque instant du soleil : si l'on transforme encore en glace fondue la quantité de chaleur qui est lancée de toutes parts dans l'espace par le soleil, on trouve que par minute elle fondrait une couche de glace qui envelopperait cet astre et qui aurait un peu plus de 11 mètres d'épaisseur, ou bien encore que cette quantité de chaleur fondrait en un jour une couche de 17 kilomètres répartie sur le soleil. D'après les motifs indiqués précédemment, ces résultats ne peuvent être considérés que comme approximatifs.

# LIVRE II.

## EFFETS CHIMIQUES.

## CHAPITRE PREMIER.

### Effets divers, phénomènes généraux.

§ 1er. *Préliminaires; action de la lumière sur les vapeurs, le phosphore, le chlore; coloration des verres.*

Les rayons lumineux jouissent de la propriété de provoquer des réactions chimiques nombreuses entre certains corps, ou d'opérer la décomposition d'un grand nombre de substances; ces effets sont rendus manifestes par les changements de couleur d'un grand nombre de ces composés et entre autres des combinaisons d'argent. Il ne semble pas que des observations de ce genre, un peu certaines, soient fort anciennes, car les auteurs du seizième et du dix-septième siècle, comme Fabricius, Gesner, Lemery, n'en citent aucun exemple. Les faits précis ne datent que du moment ou Schéele (1), comme on l'a vu dans le 1er volume, page 31, reconnut que le chlorure d'argent noircit de préférence dans les rayons violets du spectre solaire, et où Ritter en prouvant que cette action s'étend au delà du violet, dans la partie invisible de l'image prismatique, montra que le phénomène de coloration n'est pas dû à une action calorifique, mais à une action particulière exercée sur le corps par le rayonnement lumineux. Depuis cette époque les recherches se sont multipliées; elles ont surtout pris un grand déve-

(1) Schéele, *Traité de l'air et du feu*, 1777, § 66, trad. franç. 1781, p. 145. En note, dans l'ouvrage, il est dit que l'observation de Schéele est commune à lui et à Beccari, Meyer, Schultze et Senebier.

loppement après la découverte de la fixation des images de la chambre noire par Daguerre, et ont puissamment contribué aux perfectionnements apportés à cette magnifique invention.

Si les effets calorifiques peuvent être produits indifféremment sur les corps par un même groupe de rayons solaires, et ne paraissent dépendre que du pouvoir absorbant de ces corps, il n'en est pas de même des effets chimiques, qui tiennent essentiellement à la nature des substances exposées au rayonnement lumineux, et qui pour chaque substance exigent des rayons d'une longueur d'onde comprise entre certaines limites déterminées. Il y a donc dans ces réactions chimiques un genre tout particulier d'effets produits par la lumière.

Il faut d'abord examiner si la lumière peut modifier l'état physique ou l'arrangement moléculaire des corps, sans qu'il y ait action chimique entre des éléments en présence. Bien qu'on ait observé plusieurs séries de faits dont il va être question, et que les phénomènes de phosphorescence étudiés dans la première partie de cet ouvrage aient montré que les vibrations lumineuses peuvent se transmettre aux particules des corps et y exciter des vibrations persistantes pendant quelques instants, cependant on va voir que jusqu'ici c'est seulement dans une circonstance particulière où le résultat paraît dû à un changement isomérique; dans les autres, les phénomènes observés peuvent tenir le plus souvent à des effets calorifiques ou à des changements chimiques qu'on n'avait pas pu reconnaître de prime abord.

Quelques expériences de Petit, faites en 1722, avaient montré que des dissolutions de salpêtre et de sel ammoniac exposées au soleil donnaient en s'évaporant des cristallisations plus belles qu'à l'ombre. Chaptal montra plus tard (1) que des rayons lumineux isolés et tombant sur des capsules décidaient la cristallisation sur les parties des verres où ils étaient dirigés. Dorthez (2) fit des expériences analogues avec des flacons tenant du camphre en dissolution; il vit que ces flacons présentaient des cristallisations du côté où ils étaient exposés à la lumière. Il n'est pas impossible que l'action exercée par la lumière sur les vapeurs augmente leur diffusion dans l'air ambiant; mais il reste à savoir si les variations de température dues au rayonnement calorifique ne pourraient pas expliquer simplement les différences observées.

Il en est peut-être de même des changements de forme cristalline de

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse*, t. 3.
(2) *Ann. de chimie*, t. 2, p. 91.

plusieurs substances, comme l'a observé Mitscherlich (1); ainsi, les cristaux de sulfate de nickel, de séléniate de zinc, etc., qui appartiennent au système prismatique, lorsqu'on les expose en été à la lumière solaire, se changent en octaèdres à base carrée; comme le changement peut aussi se produire par l'action de la chaleur entre 20 et 30°, il n'est donc pas nécessaire d'admettre une action spéciale de la part de la lumière pour expliquer l'effet produit.

Le phosphore éprouve à la lumière des changements de couleur qui paraissent avoir été observés d'abord par Bœckmann (2). Ce chimiste a reconnu que lors de l'exposition du phosphore à la lumière solaire dans de l'azote et d'autres gaz, il se dépose sur les parois des vases une poudre qui n'a pas la même couleur dans les différents milieux, tandis qu'à l'ombre il ne se passe rien de semblable. Vogel (3), qui a repris ces expériences, a montré que le phosphore se colore également dans le vide barométrique, et se recouvre alors d'un enduit rougeâtre; il se dépose même dans ce dernier cas des paillettes rouges brillantes sur les parois du tube. Cet effet se produit rapidement dans les rayons violets du spectre et très-lentement dans les rayons rouges; Vogel a conclu de ses recherches que le composé rouge qui se forme dans les différents gaz exposés au soleil, ou qui reste après une combustion rapide, est un oxyde rouge de phosphore. Mais si, d'après les recherches de M. Schrœtter (4), le composé rouge obtenu dans la combustion du phosphore est du phosphore rouge ou amorphe, la lumière produirait donc sur le phosphore la même transformation moléculaire que la chaleur peut effectuer.

En 1844, M. Draper (5) annonça que le chlore exposé préalablement à la lumière solaire acquiert une activité plus grande pour se combiner avec l'hydrogène sous l'influence de la lumière diffuse, que s'il est resté à l'obscurité avant d'être mélangé à l'hydrogène. Pour observer ce phénomène, il disposa deux cloches pleines de chlore sur un bain d'eau salée (liquide qui dissout peu de chlore); puis l'une d'elles ayant été exposée aux rayons solaires, il la rentra près de l'autre

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 37, p. 205.

(2) Boeckmann, *De l'action du phosphore dans différents gaz*, 1800. — *Ann. de chimie*, t. 85, p. 225 (1813).

(3) *Ann. de chimie*, t. 85, p. 225.

(4) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 38, p. 148.

(5) *Philosoph. Magazine*, 1844 et 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 53, p. 155, et t. 59, p. 365.

dans l'obscurité, et ajouta à chacune d'elles une même quantité d'hydrogène; en les exposant à la lumière diffuse, la combinaison se fit plus rapidement dans la cloche qui avait été insolée avant l'expérience. D'après cela, le chlore semblerait donc posséder deux états différents, comme le phosphore, le soufre, le carbone, et la modification de ce gaz serait produite par l'influence de la lumière.

Dans des recherches que j'ai faites conjointement avec M. Fremy, nous avons été conduits à une conclusion différente : Si l'on opère comme l'a indiqué M. Draper, en préparant le chlore par la méthode ordinaire et en le recevant sur l'eau salée, on obtient les résultats qu'il a indiqués Mais en desséchant le chlore, l'enfermant dans des tubes de verre scellés à la lampe, et exposant quelques-uns de ces tubes à l'action solaire, si l'on vient à faire passer le chlore dans des éprouvettes reposant sur un bain d'eau salée, après l'avoir mélangé avec un égal volume d'hydrogène, sous l'influence de la lumière diffuse, la combinaison se fait également dans les éprouvettes renfermant du chlore préalablement insolé et dans celles qui n'en renferment pas. En opérant au contraire par la même méthode avec des tubes renfermant du chlore humide, alors on obtient une différence dans les effets. La présence de l'eau intervient donc ici, et il est probable que le chlore agissant sur la vapeur d'eau sous l'influence de la lumière, il se produit des composés oxygénés du chlore dont la combinaison avec l'hydrogène sous l'action de la lumière ne se fait pas dans les mêmes conditions que celle du chlore. L'effet observé par M. Draper tient donc probablement à un mélange de vapeur d'eau avec le chlore insolé.

Je donne ici la disposition des tubes dont nous avons fait usage, car elle est très-simple, et elle servira plus tard pour d'autres réactions produites sous l'influence de la lumière. C A B fig. 44 est un tube en verre

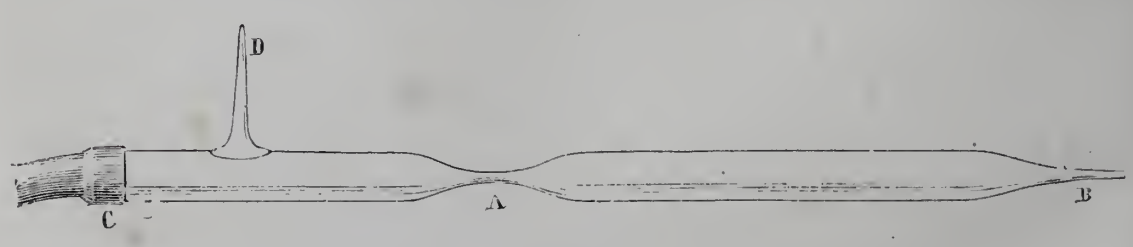



Fig. 44.

effilé en pointe en B, et aminci en A, de façon à ce qu'on peut, à l'aide d'une lampe à alcool, fondre la partie amincie et séparer le tube A B de la partie C, tout en scellant le tube. En D se trouve une pointe

effilée, et en C le système est mis en relation avec un tube en caoutchouc ou avec un appareil qui amène le gaz dont on veut se servir. On fait passer le gaz dans le système en fermant, par fusion, la pointe D; le gaz circule alors par le tube AB et sort en B. A un moment donné, on ferme à la lampe l'extrémité B et on casse la pointe D; AB reste plein de gaz, et la sortie de l'excès de ce gaz ayant lieu par D, la pression n'augmente pas. On fond ensuite le tube dans la partie rétrécie près de A, et il se trouve scellé à ses deux extrémités et rempli de gaz sec.

Dans la même série de recherches, nous avons observé, M. Fremy et moi, que le chlore provenant de la décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique et non desséché préalablement, à volume égal, agissait plus rapidement sur l'hydrogène que le chlore préparé par l'acide chlorhydrique et le peroxyde de manganèse. MM. Bunsen et Roscoe, comme on le verra dans le quatrième chapitre de ce livre, ont reconnu que la méthode de préparation du chlore pouvait influer tellement sur les effets produits, que le mélange de ce gaz, quand il était très-pur, avec l'hydrogène, pouvait détoner même à la lumière diffuse. Ces mêmes savants, dans un travail dont il sera question plus loin (1), ont été également conduits à contester l'hypothèse de M. Draper sur la différence allotropique du chlore ordinaire et du chlore insolé.

Il n'est pas impossible que le chlore puisse être modifié par l'action de la lumière, puisqu'un autre gaz, l'oxygène, peut bien se transformer en ozone par une modification allotropique due à l'influence de l'électricité; mais jusqu'ici, comme on le voit d'après les résultats précédents, ce changement dans l'état du chlore n'est pas probable et les dernières recherches faites sur ce sujet sont contraires à cette supposition.

Le verre peut éprouver des changements de teinte à la lumière; ainsi Faraday (2) a observé que le verre teint en pourpre par le manganèse prend une teinte beaucoup plus prononcée quand il a été exposé aux rayons solaires. Pelouze (3), qui s'est beaucoup occupé des causes de coloration des verres, a reconnu que des verres ordinaires pouvaient se colorer à la lumière, mais quand ils renfermaient des sels de manganèse ou de fer, et une fois la coloration obtenue, l'action de la chaleur pouvait la faire disparaître; il a également trouvé que le verre

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 100. — *Ann. de chimie et de physiq.*, 3e série, t. 55, p. 365.
(2) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 25, p. 99 (1824).
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 4e série, t. 10, p. 194 (1867).

pur, exempt de sulfates, dans les mêmes circonstances ne changeait pas de nuance.

La coloration du verre à la lumière, d'après cela, semble être due à ce que le peroxyde de fer cède une partie de son oxygène au protoxyde de manganèse, qui passerait à un état d'oxydation supérieur; le recuit du verre, c'est-à-dire l'action de la température rouge sombre, produirait une réaction inverse, qui expliquerait la décoloration. Cependant, d'après Pelouze, cette théorie laisse sans explication le fait suivant : le verre préparé avec le manganèse, qui devient violet à la lumière directe du soleil et se décolore par le recuit, puisé dans un creuset avec la canne du verrier, présente une couleur améthyste si on le trempe, en le refroidissant subitement, ou, ce qui revient au même si on ne le recuit pas; ainsi la trempe donne lieu au même effet que l'insolation. On ne sait donc pas, quant à présent, si ces effets tiennent à des changements dans l'état physique des matières exposées à l'influence lumineuse ou bien à des changements dans le degré d'oxydation des sels métalliques contenus dans les verres.

M. Niepce de Saint-Victor (1) a observé que des substances comme le papier, la porcelaine, exposées à l'influence de la lumière, puis rentrées dans l'obscurité, agissent comme réducteurs sur des papiers enduits de sels d'argent que l'on met en contact avec eux, même longtemps après l'influence lumineuse. Il avait cru pouvoir expliquer ces effets en admettant une action physique, une modification persistante dans les substances insolées; mais, d'un côté, la non-altération du sel d'argent quand on interpose entre les corps insolés et la surface sensible un écran transparent à surface très-propre, quelque mince qu'il soit; d'un autre côté, l'augmentation d'effet quand la surface insolée est couverte de substances facilement altérables à la lumière, comme le nitrate d'urane et l'acide tartrique, ainsi que les expériences faites par divers observateurs, et notamment par M. l'abbé Laborde (2), ont montré que ces effets devaient être attribués à l'action réductrice exercée au contact sur les sels métalliques par les matières organiques qui avaient subi préalablement une altération chimique à la lumière. On doit remarquer encore que ce sont les rayons violets et

(1) *Bulletin de la société photographique de Paris*, t. 3, 4, 5, 7. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 45, 46, 47 et 65, p. 505.

(2) *Bulletin de la société photographique de Paris*, t. 5, p. 213.

ultra-violets qui donnent lieu à ces effets, c'est-à-dire précisément ceux qui sont doués, en général, d'activité chimique.

Les exemples que je viens de citer sont jusqu'ici ceux pour l'explication desquels on avait supposé un changement dans l'état physique des corps; d'après ce que l'on a vu, une action calorifique ou des effets chimiques peuvent rendre compte de la plupart d'entre eux. Ce n'est que lors de la coloration du verre et de celle du phosphore où un effet physique peut paraître probable, si toutefois dans ce dernier cas la matière rouge qui se produit alors n'est pas un oxyde; mais il n'y aurait aucune difficulté à admettre que la lumière, comme la chaleur, puisse donner lieu au changement si curieux que manifeste ce corps simple.

On doit remarquer qu'il est souvent très-difficile de reconnaître quel est l'effet produit par la lumière; car en admettant qu'il y ait combinaison ou décomposition chimique, elle porte parfois sur une si faible quantité de matière que l'analyse chimique ne peut servir à la distinguer; on est donc réduit à raisonner par induction en se guidant sur des réactions que l'on peut observer sur les corps avant et après l'influence de la lumière. Il serait même possible, dans le cas du mélange de deux corps, que la présence d'une fort petite quantité d'une substance sous l'influence de la lumière vînt provoquer entre eux une réaction qui ne s'effectuerait pas sans cette intervention, de même qu'une lame de platine donne lieu à la combinaison lente de l'oxygène et de l'hydrogène.

### § 2. *Combinaisons produites sous l'action de la lumière, en présence du chlore, du brome, de l'iode ou de l'oxygène; matières colorantes.*

Je citerai d'abord comme exemples des effets si nombreux produits sous l'influence de l'agent lumineux les combinaisons qui s'opèrent quand certains corps sont en présence l'un de l'autre et que l'un d'eux se combine avec le second ou avec un de ses éléments constituants, et principalement les effets observés lors de l'action du chlore, du brome, de l'iode, ou de l'oxygène sur différentes substances.

Gay-Lussac et Thenard (1) ont montré l'action bien remarquable du chlore sur l'hydrogène quand ces gaz préparés séparément sont mélangés à volumes égaux; la combinaison de ces deux corps, qui ne se pro-

(1) *Recherches physico-chimiques*, t. 2, p. 186.

duit pas à l'obscurité, s'effectue lentement à la lumière diffuse et donne lieu à une détonation sous l'action des rayons solaires; dans chaque circonstance il se forme de l'acide chlorhydrique (1). Gay-Lussac et Thenard, comme avant eux Rumfort (2), avaient pensé que les effets chimiques dus à l'action de la lumière provenaient de la chaleur développée par les divers rayons en tombant sur les corps; cependant ils ont émis des doutes relativement à cette conclusion, en faisant remarquer que les actions chimiques produites par les rayons violets sont plus énergiques que celles des autres rayons dont l'influence thermométrique est plus grande. Les recherches faites depuis cette époque ont montré en effet que l'action chimique est indépendante de la température que les corps reçoivent de l'influence lumineuse.

Le chlore a une telle tendance à se combiner avec l'hydrogène qu'un grand nombre de matières hydrogénées mises en présence de ce gaz se décomposent à la lumière diffuse ou directe, suivant leur nature, en produisant de l'acide chlorhydrique et des composés secondaires; on verra également dans le paragraphe suivant qu'un grand nombre de chlorures, et surtout de bi-chlorures, cèdent du chlore sous l'influence de la lumière aux substances hydrogénées pour former de l'acide chlorhydrique.

L'eau qui tient en dissolution du chlore, c'est-à-dire l'eau chlorée, n'éprouve aucune altération à l'obscurité, mais à la lumière diffuse elle est altérée lentement, et à la lumière solaire elle éprouve une décomposition rapide; dans ce dernier cas on voit des bulles de gaz se dégager et gagner la partie supérieure du liquide. Voici quel est l'effet produit: l'eau se décompose, l'hydrogène s'unit avec le chlore en formant de l'acide chlorhydrique qui reste en dissolution, et il y a formation d'une certaine quantité d'acide chlorique ainsi que dégagement d'oxygène (3).

(1) On peut, dans les cours publics, faire une expérience qui met en évidence la combinaison lente du chlore et de l'hydrogène mélangés ensemble : on dispose un mégascope devant la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène tombant sur la chaux, afin de projeter sur un écran, placé au delà, l'image des objets placés sur la route du faisceau lumineux. Sur le trajet du faisceau de ces rayons on place une petite éprouvette contenant le mélange de chlore et d'hydrogène renversée sur l'eau salée, et l'action des rayons ne donne lieu qu'à une combinaison lente, qui est rendue sensible par l'ascension du liquide dans l'éprouvette.

On verra plus loin que si les gaz sont préparés ensemble par la décomposition électrolytique, alors le mélange peut détonner sous l'influence d'une lumière relativement bien moins intense.

(2) *Annales de chimie*, t. 33.

(3) Voir *Ann. de Poggend.*, t, 94, p. 597, un mém. de M. Wittwer, puis un autre de MM. Bunsen et Roscoe, t. 96, p. 373 et t. 97, p. 304.

La plupart des hydrogènes carbonés sont décomposés à la lumière par le chlore; indépendamment de l'acide chlorhydrique, il en résulte des produits chlorés. On peut citer, entre autres, les résultats suivants (1) :

Chlore et gaz des marais ($C^4 H^8$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière diffuse action lente; à la lumière solaire action vive et détonation. Il se forme successivement les produits $C^4 H^6 Cl^2$, $C^4 H^4 Cl^4$, $C^4 H^2 Cl^6$ (chloroforme) et enfin avec un excès de chlore ; il se produit du de chlorure carbone $C^4 Cl^8$.

Chlore et gaz oléfiant ($C^8 H^8$). Aucune action à l'ombre ; à la lumière diffuse action assez rapide; à la lumière solaire action rapide sans détonation. Avec des volumes égaux de ces deux gaz, il se forme un composé, la liqueur des Hollandais, dont la formule chimique est $C^8 H^8 Cl^4$, ou mieux, d'après ses réactions, $C^8 H^6 Cl^2 + Cl^2 H^2$. Par l'action prolongée du chlore, on a, d'après M. Regnault, différents produits et enfin $C^8 Cl^{12}$, le sesqui-chlorure de carbone.

Chlore et benzine ($C^{24} H^{12}$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière diffuse action lente; à la lumière solaire action plus vive, et formation du composé $C^{24} H^{12} Cl^{12}$, c'est-à-dire $C^{24} H^6 Cl^6 + H^6 Cl^6$.

Chlore et naphtaline ($C^{10} H^4$). Peut-être action à l'obscurité; à la lumière diffuse, comme au soleil, action vive, dégagement abondant d'hydrogène et formation d'une série de produits qui dérivent de la naphtaline. La plupart des hydrogènes carbonés liquides ou solides éprouvent de la part du chlore une action analogue à celle de cette dernière substance.

D'autres composés organiques, comme l'acide acétique, l'éther sulfurique, l'alcool, etc., donnent divers produits quand ils sont soumis à l'action lumineuse en présence du chlore :

Chlore et acide acétique ($C^8 H^6 O^3 + H^2 O$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière solaire action très-vive et formation d'acide chloracétique $C^8 Cl^6 O^3 + H^2 O$.

Chlore et éther sulfurique ($C^8 H^{10} O$ ou $C^8 H^8 + H^2 O$). A l'obscurité l'action n'a pas été examinée; à la lumière diffuse, action assez vive, élévation de température et formation d'un produit qui n'est pas altéré par le chlore, quelle que soit la durée de l'action, et dont la composition est $C^8 H^6 O Cl^4$.

(1) Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 492. — Voir les mémoires de M. Regnault et de M. Laurent, *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 60 à 71.

Chlore et alcool. Réaction lente à la lumière diffuse et qui devient très-vive au soleil; il se forme des produits divers qui n'ont pas été examinés. Si l'on fait passer des bulles de chlore dans de l'alcool saturé de chlore renfermé dans un flacon exposé au soleil, à chaque bulle qui sort du tube il y a détonation, formation d'acide chlorhydrique et dépôt de charbon.

Le chlore et l'acide cyanhydrique, suivant Serullas, donnent par leur réaction, sous l'influence solaire, de l'acide chlorhydrique et du perchlorure de cyanogène.

Un certain nombre de chlorures métalliques qui peuvent passer à un état de chloruration moindre réagissent sur plusieurs composés hydrogènes sous l'influence de la lumière en cédant du chlore; ainsi le perchlorure de fer dissous dans l'alcool et exposé aux rayons solaires laisse déposer de l'oxyde de fer; l'alcool se décolore, et il se forme des produits éthérés. Nous reviendrons sur ces effets en traitant de la décomposition des composés métalliques.

Le brome et l'iode se comportent comme le chlore à l'égard de l'hydrogène, sous l'influence des rayons lumineux, avec cette différence toutefois que les effets ne sont pas aussi énergiques; le brome agit moins vivement que le chlore, et l'iode moins que le brome. Ainsi le brome et le gaz des marais exposés aux rayons solaires ne présentent qu'une action à peine appréciable; mais le brome donne avec le gaz oléfiant un composé du même genre que celui qui se forme avec le chlore. L'iode et le gaz des marais ne donnent lieu à aucune réaction à la lumière; l'iode et le gaz oléfiant, dans les mêmes conditions, forment un produit analogue à la liqueur des Hollandais, et qui est facilement décomposé, soit par la chaleur, soit spontanément.

Plusieurs combinaisons de plomb sont sensibles à l'influence des rayons solaires, et parmi eux le protoxyde de plomb; il est facile de prouver que l'effet est dû à une oxydation de la matière par l'oxygène de l'air atmosphérique. Le protoxyde de plomb a un état physique dépendant de son arrangement moléculaire; suivant qu'il a été chauffé ou fondu il est à l'état de massicot ou de litharge. Si on le prépare en faisant bouillir de l'hydrate de plomb dans la potasse, il est anhydre, offre une teinte jaune paille, et paraît formé de petits grains cristallins. Dans cet état, il est impressionnable à l'action des rayons solaires ou à celle de la lumière diffuse prolongée, et prend une teinte plus foncée.

J'ai placé cet oxyde dans des tubes semblables à ceux de la fig. 44.

Dans le vide ou dans l'hydrogène sec, à la lumière solaire, il n'y a aucun changement au bout de plusieurs jours; dans l'air sec, au contraire, la poudre se colore, ce qui montre que l'oxygène est nécessaire pour la réaction, et en agitant la masse, au bout de plusieurs mois, elle a une couleur orangée indiquant sa transformation partielle en minium; l'oxydation de la matière est donc manifeste. Je dois faire remarquer que dans les flacons contenant cet oxyde jaune et qui sont exposés à la lumière, la teinte de la matière n'est pas orangée contre les parois et tourne au brun; quand on fixe l'oxyde sur du papier avec un peu de gomme, on a la même nuance; il est donc possible que le minium, une fois produit, se transforme en peroxyde et que ce soit ce composé qui donne la teinte brune observée alors, car le minium se colore également à la lumière, mais moins rapidement que le protoxyde de plomb.

Lorsque le protoxyde jaune de plomb est placé sous une cloche et que l'humidité et l'acide carbonique de l'air peuvent agir sur lui en même temps que la lumière, on peut voir d'autres nuances se produire : j'avais abandonné une certaine quantité d'oxyde jaune pendant deux ans à l'action simultanée de la lumière diffuse ou solaire et de l'atmosphère, en le couvrant d'une cloche; on remuait la masse tous les deux ou trois jours : au bout de peu de temps la matière qui avait d'abord bruni est devenue plus pâle, et à la fin elle avait une teinte blanche grisâtre. L'analyse a montré que le protoxyde PbO s'était transformé en hydrocarbonate ou $PbO\ Co^2 + PbO\ HO$ (1). Ainsi, l'acide carbonique et l'eau avaient altéré le composé au point de faire disparaître toute trace de l'action lumineuse.

J'ai remarqué que lorsqu'on fait chauffer légèrement le carbonate de plomb, on obtient du protoxyde qui est également d'un jaune pâle; il ne faut pas élever beaucoup la température, car la teinte tourne de suite à l'orangé. En étendant cette matière pulvérulente jaune pâle sur du papier, elle brunit à la lumière comme l'oxyde dont il vient d'être question; cette coloration a lieu, dans l'un et l'autre cas, sous des verres blancs et bleus, et nullement sous des verres rouges ou jaunes; ce qui montre que l'action est produite par les rayons les plus réfrangibles de la lumière. Je dois mentionner ici une observation assez intéressante; une feuille de papier recouverte de ce composé, primitivement un peu colorée à la lumière diffusé, a présenté une déco-

(1) Cette analyse a été faite par M. Cloëz.

loration sous l'influence des verres jaunes et rouges. Je n'ai pas eu occasion de répéter cette observation et de savoir, si dans ce cas, comme peut-être avec le gaïac, dont on parlera ci-après, il ne se produirait pas un effet chimique opposé au premier, c'est-à-dire une destruction du nouveau corps formé par l'action de la lumière, ou bien si la réaction manifestée en second lieu ne produirait pas un oxyde de plomb ayant un autre degré d'oxydation; c'est une question qui reste à éclaircir.

L'oxygène sous l'influence de la lumière peut s'unir non-seulement à plusieurs composés métalliques, mais encore à un très-grand nombre de substances de la nature organique, et donner lieu à une foule de réactions que l'on n'apprécie souvent que lorsqu'elles sont accompagnées d'un changement de couleur. Ces matières sont pour ainsi dire brûlées par l'action des rayons lumineux. On peut citer d'abord, comme exemple de ces effets, les changements observés avec la résine de gaïac.

On avait remarqué que cette résine se colorait à la lumière (1); mais Wollaston (2) a analysé l'action des différents rayons colorés sur cette substance. Il a reconnu que si l'on imbibe une feuille de papier avec une solution alcoolique de cette résine, ce papier paraît jaunâtre à l'obscurité, mais change de couleur à la lumière diffuse ou solaire et devient promptement verdâtre puis vert bleuâtre. Comme les corps oxydants tels que le chlore, le brome, lui donnent cette couleur, l'effet produit doit résulter d'une action de l'oxygène de l'air sur la résine, sous l'influence de la lumière. Ce n'est pas le seul effet observé avec cette matière; cette coloration bleue, comme Wollaston l'a vu, et comme on le dira plus loin, est donnée par les rayons violets, tandis que les rayons rouges et jaunes du spectre décolorent la matière colorée, et lui donnent une teinte jaunâtre indiquant une destruction du produit de l'oxydation provoquée par les rayons les plus réfrangibles. Les rayons les moins réfrangibles exercent-ils en effet une action inverse de celle des rayons les plus réfrangibles, ou bien la matière bleue, subissant l'effet ordinaire de la plupart des matières colorantes, n'est-elle pas détruite à son tour par la lumière? C'est un point qui reste à décider.

On doit dire, cependant, que si l'on fait agir simultanément sur la résine

(1) Senebier, *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière*, etc.; Genève, 1782, t. 2, p. 408.

(2) *Journal de Nicholson*, t. 8, p. 293 (1804).

de gaïac une certaine partie des rayons les plus réfrangibles avec les rayons les moins réfrangibles, la matière ne change pas sensiblement de nuance, fait qui serait favorable à la première hypothèse; d'un autre côté, j'ai observé qu'une feuille de papier enduite de gaïac et bleuie par le chlore se décolore rapidement dans un tube vide au soleil, et le papier étant ainsi resté pendant plusieurs jours au soleil, traité de nouveau par le chlore, n'a pas repris sa couleur bleue primitive; il n'a présenté qu'une nuance verdâtre faible; ainsi la matière avait été altérée et n'était pas simplement revenue à son état initial. On peut aisément démontrer la nécessité de la présence de l'oxygène pour la coloration de la résine de gaïac; on prend un tube préparé comme le tube AB fig. 44, page 48, dans lequel on met des bandes de papier préparé, et ou l'on fait le vide ou bien que l'on remplit de gaz hydrogène; dans l'un ou l'autre cas, le papier reste avec la teinte jaunâtre primitive malgré une longue exposition au soleil. Quelques traces d'oxygène lui donnent au contraire une coloration sous l'influence de la lumière.

M. Biot a montré que le principe actif de la résine de gaiac est une matière qui se colore en bleu à la lumière, et que les teintes ne paraissent verdâtres sur le papier qu'en raison de son mélange avec une matière jaune inactive (1); la matière jaune est soluble dans l'eau et dans l'alcool; la matière qui bleuit n'est soluble que dans l'alcool. On les sépare de la manière suivante : on fait bouillir la résine de gaiac, ou bien le bois de gaïac, dans de l'eau pour enlever la matière jaune extractive; après plusieurs lavages à l'eau, on sèche cette résine ou ce bois et on le traite avec de l'alcool; on se sert ensuite de cette teinture alcoolique pour imbiber des feuilles de papier, et on a des surfaces qui deviennent bleues à la lumière au lieu de devenir bleues-verdâtres.

La plupart des matières organiques éprouvent des effets d'oxydation analogues, et donnent des produits plus ou moins stables; lorsqu'il y a changement de nuance ou décoloration à la lumière, l'effet est indiqué par ce résultat seul. On sait que la plupart des matières colorantes isolées, ou fixées sur des étoffes, s'altèrent sous l'action de la lumière, et on verra dans le chapitre suivant quelles sont les parties du spectre solaire qui agissent sur un certain nombre d'entre elles. Senebier (2),

(1) *Comptes rendus de l'Institut de France*, t. 8, p. 598.

(2) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire*, etc..., t. 3, p. 211 (1782).

dans ses mémoires relatifs à l'action de la lumière, a donné des indications sur des altérations de ce genre observées avec des matières colorantes isolées ou tenues en dissolution.

M. Chevreul, dans le cours de ses recherches sur la teinture (1), a étudié d'une manière complète les changements qu'un certain nombre de matières colorantes fixées sur des étoffes de coton, de soie, de laine éprouvent de la part de la lumière, des agents atmosphériques et du gaz hydrogène, ainsi que l'influence que peut avoir sur les changements observés la nature des corps sur lesquels est fixée la matière. Il a reconnu que dans le vide sous l'influence de la lumière le rocou, le carthame, l'orseille, l'acide sulfo-indigotique, l'indigo, n'ont pas été sensiblement altérés pendant deux ans, mais que la décoloration a eu lieu dans l'air, de sorte qu'il faut le concours de l'oxygène pour la produire. Le curcuma a présenté dans le vide une décoloration indiquant peut-être la présence de l'oxygène dans l'appareil où l'on a opéré, ou bien la décomposition de la substance. Quant au bleu de Prusse (cyanure de fer), il subit une altération dont il sera question dans le paragraphe suivant. Les dispositions expérimentales indiquées dans les mémoires de M. Chevreul sont très-propres à mettre en évidence l'influence de la lumière sur les matières colorantes.

Lorsque les matières organiques n'éprouvent aucun changement de couleur, elles peuvent subir l'influence de la lumière, mais alors les effets sont plus difficiles à distinguer. On peut citer les hydrogènes carbonés, les huiles essentielles comme présentant sous l'action des rayons solaires des effets plus ou moins énergiques. Pour observer ces réactions on peut remplir de petites éprouvettes avec du gaz oxygène et les placer, en les renversant, dans des vases contenant une certaine quantité du liquide que l'on veut étudier, comme l'essence de térébenthine, la benzine, etc.; on en place une à l'obscurité, l'autre à l'action des rayons solaires, et au bout de quelques heures on compare les effets produits dans les deux appareils. La plupart des huiles essentielles indiquent, dans ces conditions, une absorption d'oxygène et par conséquent leur combinaison avec ce gaz.

M. Jodin (2), qui s'est occupé de l'action chimique que la lumière exerce sur un certain nombre de matières d'origine végétale, parmi lesquelles

(1) Chevreul, 4e *mémoire sur la teinture. Mém. de l'Académie des sciences*, t. 16, p. 53 (1838).

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tom. 59, p. 857; 1864.

on peut citer l'huile essentielle de lavande et l'essence de térébenthine, a reconnu qu'une solution alcoolique de tannin peut se conserver presque indéfiniment à l'obscurité, au contact de l'air, sans absorber de l'oxygène, mais qu'il n'en est plus ainsi quand on l'expose à la lumière : l'oxygène est alors absorbé. Les solutions aqueuses de ce corps se comportent de même.

Une solution alcoolique de chlorophylle s'oxyde également dans les mêmes circonstances, de sorte que cette matière, qui sous l'empire de la vie végétale est formée par l'action de la lumière, se brûle, comme la plupart des principes immédiats de la nature organique, quand elle est soumise à l'influence du rayonnement lumineux hors des tissus dans lesquels elle était renfermée.

Le changement de solubilité du bitume de Judée sous l'influence de la lumière, comme on le verra dans le livre III, tient à une action de ce genre. Les huiles grasses et les corps gras éprouvent, comme on le sait, une oxydation lente au contact de l'air; cette oxydation, qui est activée par la chaleur, est aussi rendue plus rapide par la lumière, et non-seulement, comme l'a observé M. Cloëz (1), l'intensité de la lumière a une action bien manifeste, mais encore sa composition, car l'oxydation de ces matières a lieu plus rapidement sous l'influence des rayons les plus réfrangibles bleus et violets que sous l'action des rayons les moins deviés par le prisme. M. l'abbé Laborde (2) a utilisé l'action chimique exercée par la lumière sur l'huile de lin combinée à l'oxyde de plomb, et ainsi qu'on le verra plus loin, pour préparer un vernis impressionnable destiné à la formation des gravures photographiques.

Cette action oxydante peut se manifester encore lors de l'action de la lumière sur les substances comme l'acide tartrique, etc., et l'on a vu page 50 que l'on devait probablement attribuer aux composés résultant de cette action les effets réducteurs que peuvent produire ces substances lorsqu'elles sont en contact avec certains sels métalliques, effets que l'on avait attribué à toute autre cause (3).

Ainsi, les effets présentés par les matières colorantes, comme par d'autres matières organiques, montrent que l'action de la lumière détermine, en général, la combinaison de l'oxygène avec un ou plusieurs éléments constituants de la substance. On peut facilement

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 321 et 981 (1865).
(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 4, p. 213 (1858).
(3) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 5, p. 213 (1859).

étudier quelques-uns des effets dont il s'agit ici en se servant de tubes semblables à celui de la figure 44, dans lesquels on a fait le vide ou que l'on a remplis de différents gaz comme l'azote et l'hydrogène. Du reste, il en sera question dans le chapitre II, lorsqu'on traitera de l'action du spectre solaire sur les matières chimiquement impressionnables.

§ 3. *Décompositions produites sous l'influence de la lumière. Combinaisons d'argent, d'or, de platine, de mercure, de fer, etc.; substances organiques.*

Le nombre des substances qui donnent lieu à des réactions sous l'influence de la lumière, ou qui sont décomposées en partie ou en totalité, est très-considérable; on ne citera ici que celles qui conduisent aux résultats les plus nets et les mieux établis. La lumière, comme la chaleur, peut donner lieu à des réactions diverses même sur une seule matière, et les différences observées tiennent le plus ordinairement à la réfrangibilité des rayons actifs.

En général, les sels des métaux qui ont plusieurs degrés d'oxydation sont impressionnables quand ils sont à l'état de sels de peroxyde, car ils tendent à passer à un degré inférieur d'oxydation sous l'influence de l'agent lumineux. La lumière peut en effet agir sur eux en exerçant une action réductrice, soit quand ils sont isolés, ce qui est le moins fréquent, soit la plupart du temps lorsqu'ils se trouvent mélangés à des composés réducteurs, qui sont presque toujours des substances organiques; ces dernières se brûlent donc à la lumière aux dépens des éléments de la substance impressionnable. Ainsi le mélange d'un corps avec une substance qui puisse lui enlever ou lui céder un de ses éléments constituants favorise l'action de la lumière, et la plupart du temps la détermine quand elle n'aurait pas eu lieu sans cela.

L'état physique des corps impressionnables peut exercer une action très-marquée sur les effets produits : ainsi, parmi les sels d'argent obtenus à l'état de précipitation par double décomposition, le chlorure et le bromure sont très-sensibles, l'iodure ne l'est pas. Lorsque ces mêmes composés sont préparés à la surface de lames d'argent à l'aide des vapeurs d'iode, de brome ou du chlore, l'iodure est au contraire très-sensible, le bromure moins, et le chlorure donne des effets particuliers, dont on parlera plus tard. Si l'iodure déposé sur une lame d'argent est exposé pendant un temps très-court aux émanations du

brome ou du chlore, alors la couche peut devenir soixante fois plus impressionnable qu'avant cette réaction. Mais quand les sels d'argent sont préparés sur du papier par voie de double décomposition, l'état d'humidité influe sur la sensibilité du papier : humides, ils sont rapidement colorés à la lumière; secs, ils le sont moins promptement.

*Combinaisons d'argent.* — Parmi les substances impressionnables, les composés d'argent sont certainement ceux qui donnent les résultats les plus intéressants pour l'étude du rayonnement lumineux. L'oxyde d'argent AgO, même isolé, à l'abri de toute matière organique et déposé sur du verre (1), est impressionnable à la lumière et noircit; il est probable qu'il se produit une désoxydation partielle ou totale, mais probablement partielle, et, d'après M. Hunt, la réduction complète du métal ne peut être obtenue que par l'intervention d'une matière organique. Cette action est analogue à celle que l'on va étudier ci-après avec le chlorure, l'iodure et le bromure du même métal. On peut préparer des papiers sensitifs à l'aide de cette substance, en trempant une feuille de papier dans une solution d'azotate d'argent, puis quand elle est sèche, en la lavant dans une solution étendue de potasse. L'oxyde d'argent formé à la surface du papier est rapidement noirci à la lumière.

Le chlorure d'argent ($Ag\ Cl^2$), que l'on obtient par double décomposition entre une dissolution d'un sel d'argent et une autre d'un chlorure, est un composé d'un blanc éclatant; aussitôt qu'il reçoit l'influence de la lumière diffuse ou solaire, il se colore, commence par prendre dans les premiers instants une teinte bleuâtre, qui passe au violet et bientôt au brun, mais prend une teinte de plus en plus foncée. Si le chlorure est parfaitement sec, à mesure qu'il se colore il émet du chlore, de sorte que l'action de la lumière lui fait subir une espèce de réduction. Cette action est toute spéciale de la part de l'agent lumineux, car en chauffant le chlorure d'argent, on le fond sans le colorer, tandis que l'influence de la lumière solaire ou des lumières artificielles donne lieu à cette réaction.

Si on laisse la lumière agir pendant longtemps sur du chlorure sec, on trouve que la composition de ce corps s'approche d'être celle de Ag Cl, c'est-à-dire d'un sous-chlorure, contenant seulement un équivalent de chlore. Mais on a supposé que la lumière pouvait donner lieu à une réduction complète, et qu'en définitive si l'action lumineuse était épuisée,

(1) Hunt. *Philosoph. mag.*, oct. 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 59, p. 260.

il ne resterait que de l'argent métallique. Je ne crois pas que l'effet soit aussi simple, et je pense qu'il y a d'abord formation d'un sous-chlorure violet Ag Cl, et que ce dernier peut être décomposé à son tour par une action suffisamment intense et prolongée. Les observations sur lesquelles on peut se fonder pour soutenir cette opinion sont les suivantes :

1° Le chlorure altéré par la lumière se dédouble instantanément par l'action des dissolvants du chlorure blanc comme l'ammoniaque, l'hyposulfite de soude, les chlorures alcalines, etc. : du chlorure blanc se dissout et de l'argent métallique reste. Cet argent se dissout ensuite facilement dans l'acide azotique. Or, si l'on traite de suite par l'acide azotique le chlorure altéré à la lumière, ce n'est que très-lentement que ce composé éprouve un changement et donne lieu à une dissolution d'argent.

2° Quand on a une surface sur laquelle se trouve une couche de chlorure d'argent déjà coloré par la lumière, le spectre solaire, comme on le verra plus loin, donne à cette couche impressionnée des teintes particulières, dans le rouge et le bleu du spectre ; ces teintes étant analogues à celles du sous-chlorure formé directement sans l'intervention lumineuse, il est donc probable que ce composé existe dans le chlorure impressionné. Si ce dernier était formé d'un mélange d'argent et de chlorure blanc, on n'observerait aucun effet de ce genre.

Wetzlar (1) a reproduit chimiquement une matière analogue au sous-chlorure violet en versant du bichlorure de fer ou de cuivre sur des lames d'argent en feuilles ; l'argent se réduit de suite en petites paillettes noires violacées, que l'on lave aussitôt, car un contact plus prolongé donnerait naissance à du chlorure blanc.

J'ai analysé deux échantillons de ce produit préparé de la manière suivante : le bichlorure de cuivre a été formé par un mélange de sel marin et de sulfate ou d'azotate de cuivre, et l'on a projeté dans cette solution de l'argent nouvellement précipité sur du zinc ; aussitôt il s'est formé une poudre violette qui a été lavée dans l'eau bouillante.

1 gr. de matière traité par l'eau régale a donné 1 gr. 132 de chlorure blanc. Le chlorure blanc $Ag\,Cl^2$ étant formé de 0,753 d'argent et 0,247 de chlore, on a pour le poids des éléments dans la matière d'essai :

| | | |
|---|---|---|
| Argent, 0,853 | ou | 85,3 |
| Chlore, 0,147 | | 14,7 |
| Total, 1 gr. | | 100. |

(1) Berzelius, *Traité de chimie*, 2me édit. française, 1847, t. 4, p. 260.

En admettant la formule Ag Cl, on aurait dû trouver 85,9 d'argent et 14,1 de chlore.

Une autre quantité de 1 gr. de matière traitée par l'ammoniaque a donné un résidu d'argent de 0, gr. 42. Le chlorure blanc dissous précipité par l'acide azotique pesait 0, gr. 56, et renfermait 0, gr. 423 d'argent et 0,137 de chlore; la composition de la matière était donc :

| | |
|---|---|
| Argent. . . . . | 84,3 |
| Chlore. . . . . | 13,7 |
| Total. . . . . | 98, |

et la perte a été de 2 milligr. On voit que la composition est sensiblement celle de Ag Cl. D'un autre côté, M. Wohler a obtenu comme résidu du traitement du mellitate d'argent porté à 100° une matière qui paraît contenir l'argent à l'état de protoxyde ; l'acide chlorydrique y forme un précipité brun qui pourrait être analogue au sous-chlorure Ag Cl. On doit observer que si la réaction qui a lieu sur le chlorure blanc sous l'action de la lumière commence par donner lieu au sous-chlorure Ag Cl, comme ce composé est lui-même altéré par la lumière, il est probable que l'effet final sur le chlorure blanc doit tendre à une réduction complète, à moins qu'il ne se forme un composé encore moins chloruré que Ag Cl.

Le chlorure d'argent peut être déposé sur la surface du papier, du carton, ou sur une couche de collodion appliquée sur le verre ; on le produit alors par double décomposition, en imprégnant la surface avec un chlorure, puis en plongeant celle-ci dans une dissolution d'azotate d'argent. Mais dans ces conditions la présence du composé soluble d'argent, de l'azotate, a une influence sur l'effet produit par la lumière; non-seulement la sensibilité du corps est augmentée, mais l'effet produit par le spectre solaire est différend; en effet, on verra dans le chapitre suivant que l'action s'étend un peu plus loin du côté du vert, et, en outre, que la substance préalablement impressionnée est sensible entre le bleu et le rouge prismatique. Du reste, le mélange des matières impressionnables et des composés organiques réducteurs a une très-grande influence sur l'altération des sels métalliques et est utilisé dans la photographie.

MM. Davanne et Girard (1) pensent que l'azotate d'argent mélangé au chlorure n'agit que par sa présence en absorbant le chlore au mo-

(1) *Recherches sur la formation des images photographiques;* Paris, 1864 p. 36.

ment de la décomposition du chlorure insolé, et en fournissant une nouvelle quantité de chlorure qui est de nouveau décomposée, etc... ; de sorte qu'une certaine quantité de chlorure peut donner lieu à une quantité d'argent réduit plus grande que celle qu'il contient. Il est possible que l'action exercée sur le chlore provenant de la décomposition du chlorure augmente la sensibilité de cette dernière substance; mais l'influence particulière que les rayons orangés jaunes et verts exercent sur le chlorure d'argent en présence de l'azotate de cette base, comme on le verra dans le chapitre suivant, indique une action différente de celle qui est produite sur le chlorure blanc isolé.

On a supposé que le chlorure d'argent formé par double décomposition était précipité et même fondu, et qu'il était fixé sur un corps servant de support. Si on l'obtient en attaquant directement une lame d'argent par le chlore, il donne des couches grisâtres ou violacées, en général moins impressionnables, mais présentant d'autres effets qui seront étudiés plus loin avec détails dans le quatrième chapitre du livre III, relatif à la photographie.

Le bromure d'argent préparé par voie de double décomposition offre à la lumière des effets analogues à ceux du chlorure; seulement, son altérabilité paraît être plus grande; sa coloration est noire verdâtre. Obtenu par double décomposition à la surface du papier, du collodion, etc., et en présence de l'azotate d'argent et de différents sels, il donne des effets analogues.

L'iodure d'argent, qui en général se comporte de même, peut donner cependant des effets dépendant des circonstances dans lesquelles on le produit. Ce corps, obtenu par double décomposition, est jaunâtre, et quand il est neutre et bien lavé, il n'est pas impressionnable à la lumière; mais vient-il à être mélangé d'azotate d'argent, il le devient à un très-haut degré. Pour répéter cette expérience, on prépare de l'iodure d'argent précipité jaune, au moyen de l'iodure de potassium et de l'azotate d'argent; on lave bien ce composé et on le place dans deux capsules que l'on peut exposer, sous des cloches en verre, à l'action des rayons solaires; dans une des capsules, on met l'iodure isolé et pur; dans l'autre, on ajoute quelques gouttes d'une dissolution de d'azotate d'argent qui mouille l'iodure. Après avoir exposé les deux capsules à la lumière pendant plusieurs heures, on reconnaît que l'iodure isolé n'est pas altéré, tandis que celui qui est imprégné d'azotate est rapidement coloré en noir.

Dans cette circonstance, l'action de l'azotate d'argent, ainsi que celle d'autres composés de ce métal, augmente l'impressionnabilité de l'iodure, non-seulement en s'emparant de l'iode lors de l'insolation, mais encore en aidant à l'action réductrice de la lumière. Le chlorure et le bromure d'argent placés dans les mêmes conditions deviennent également plus impressionnables que lorsqu'ils sont isolés.

M. Poitevin, qui partage cette opinion (1), a trouvé qu'une dissolution de tannin produit le même effet que l'azotate d'argent et donne à l'iodure d'argent précipité et inactif une sensibilité aussi grande que celle que l'azotate peut lui communiquer.

On peut obtenir l'iodure d'argent en attaquant directement une lame d'argent avec la vapeur d'iode; cet iodure est très-impressionnable à la lumière, et donne naissance à un composé analogue au sous-chlorure et au sous-bromure. Daguerre a découvert la préparation de cette couche sensible dont il a fait usage pour fixer les images de la chambre noire. La présence de l'argent semble donner à l'iodure le même accroissement de sensibilité que lui donne un sel soluble d'argent quand on le prépare à l'état de précipité. Quand l'iodure préparé sur les lames de plaqué d'argent est mélangé de chlorure ou de bromure, sa sensibilité est de beaucoup augmentée, car on verra plus tard que le brome donne à ce composé une impressionnabilité qui peut devenir 60 fois plus grande que celle qu'il possède.

L'analogie entre les trois composés, chlorure, bromure et iodure d'argent, se retrouve dans la plupart des actions que la lumière exerce sur eux et dans celles des réactifs chimiques. Ainsi, presque tous les corps qui dissolvent ces sels opèrent la décomposition des sous-combinaisons formées sous l'influence de la lumière, en donnant naissance à de l'argent métallique et à un chlorure, bromure ou iodure qui se dissout; mais l'hyposulfite de soude est un des dissolvants qui facilitent le plus cette décomposition.

On vient de voir que le chlorure et le bromure d'argent, même isolés des matières organiques ou de la présence d'autres corps, étaient altérés par la lumière; il en est de même de la plupart des composés binaires de l'argent. Mais les composés ternaires ou quaternaires, les sels tels que l'azotate d'argent, le sulfate, etc., généralement ne sont pas altérés, à moins de se trouver en présence de matières organiques qui jouent le

(1) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 9, p. 306.

rôle de réducteurs; comme résultat final, il se produit alors de l'argent métallique. Ainsi l'azotate d'argent cristallisé ou fondu mis dans un tube à l'abri des matières organiques n'est pas altéré par les rayons lumineux ; en présence du papier, du collodion, de la gélatine, il donne rapidement de l'argent métallique. Le charbon sous l'influence de la lumière exerce également un pouvoir réducteur sur l'azotate d'argent : quand on place dans une éprouvette une dissolution de ce sel dans laquelle se trouve un morceau de charbon, à l'obscurité on n'observe rien, mais à la lumière il se dépose de l'argent métallique sur la surface de ce corps.

Je citerai encore la réaction produite entre l'iodure de potassium ou de sodium et l'argent : en mettant en digestion de l'argent métallique nouvellement précipité avec une solution assez concentrée d'iodure de potassium, il y a double décomposition ; il se forme de l'iodure d'argent, et la base est mise en liberté. Avec une solution faible de sel, l'action est très-lente, mais elle est accélerée par la lumière. On indiquera plus loin l'effet produit par le spectre lumineux sur une feuille de papier recouverte d'argent réduit et lavé avec une couche plus ou moins concentrée d'un iodure alcalin.

Un très-grand nombre de sels métalliques éprouvent une altération de la part de la lumière ; mais, sauf pour quelques-uns, on n'a pas fait une étude aussi étendue qu'à l'égard des composés d'argent ; on n'a observé que les actions les plus frappantes, et il est probable que des recherches spéciales feraient connaître des réactions qui, n'étant pas aussi promptes, ne donnent lieu qu'à des effets moins facilement appréciables. Je vais parler des principales observations qui ont été faites avec différents composés métalliques.

*Composés d'or.* — Les combinaisons d'or éprouvent de la part de la lumière une action réductrice analogue à celle des composés d'argent ; parmi eux on peut citer le chlorure, l'oxyde d'or ; mais les réactions n'étant pas très-promptes, elles ont été peu examinées. Néanmoins, comme on le verra dans les paragraphes suivants, on a fait usage du papier enduit de chlorure d'or pour étudier l'action de la lumière. La dissolution de chlorure d'or dans laquelle on plonge du charbon donne également, comme l'azotate d'argent, du métal réduit sur le charbon quand on l'expose aux rayons solaires.

*Sels de platine.* — Quelques composés de platine sont également impressionnables à la lumière, et donnent lieu à des effets analogues à

ceux que l'on observe avec les combinaisons d'or. Une réaction assez curieuse se produit avec le chlorure de platine (1) : quand, après avoir fait dissoudre du platine dans l'eau régale, on neutralise l'excès d'acide avec de la chaux, en filtrant le liquide et en le mélangeant avec de l'eau de chaux, ce mélange reste limpide quand on le conserve à l'obscurité ; mais s'il est exposé à l'action des rayons solaires, il donne immédiatement lieu à un précipité. A la lumière diffuse, l'action a lieu plus lentement. Le précipité est de l'oxyde de platine, et il se manifeste dans cette circonstance, le même effet qu'avec certains sels de peroxyde de fer, d'urane et de mercure, dont il va être question; il y a décomposition partielle du composé et passage du métal de l'état de bichlorure à l'état de protochlorure. M. J. Herschell a observé que l'effet était produit par l'extrémité violette du spectre.

*Sels de molybdène.* — Une réduction partielle s'observe aussi avec le sulfate de molybdène qui, d'après l'observation de M. Phypson (2), se colore en bleu à la lumière, pour perdre sa couleur à l'obscurité en reprenant de l'oxygène.

*Combinaisons de plomb.* — Plusieurs composés de plomb sont sensibles à l'influence des rayons solaires, et l'on a vu dans le paragraphe précédent, page 54, que le protoxyde de plomb s'oxydait alors en présence de l'air. Le minium se colore aussi à la lumière, mais moins rapidement que le protoxyde jaune. Le peroxyde, d'après Davy (3), quand il est humide, changerait également de couleur, et ce changement aurait lieu dans les rayons rouges, tandis que dans le violet du spectre il ne serait pas affecté. J'ai cru observer une légère décoloration sur du peroxyde puce de plomb très-pur exposé pendant quelque temps à la lumière sous un verre blanc; c'est un sujet qui mérite d'être étudié de nouveau.

L'iodure de plomb éprouve sous l'influence solaire une altération sensible (4); mais la décomposition de l'iodure et le départ de l'iode sont rendus bien manifestes en mélangeant ce corps, après sa précipitation, avec une gelée d'amidon (5), qui a la propriété de se colorer en bleu par

(1) *Philos. magas.*, juin 1832. — Herschel, *Traité d'optique*, traduct. franç., tom. 2, p. 582.

(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 9, p. 286.

(3) Davy, *Éléments de philosophie chimique;* traduct. de van Mons, t. 1, p. 335.

(4) Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 497.

(5) Mémoire de M. Roussieu, *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 2, p. 149.

les moindres traces d'iode en formant de l'iodure bleu d'amidon. La teinte de l'iodure, au lieu de rester jaune, devient verte plus ou moins foncée, par suite du mélange des deux couleurs jaunes et bleues. On peut même obtenir ainsi un papier sensitif dont l'iodure de plomb est la matière impressionnable.

*Combinaisons de cuivre.* — Une plaque de cuivre exposée à la vapeur d'iode, comme la plaque daguerrienne, se recouvre d'une couche d'iodure faiblement impressionnable, et les cristaux blancs de proto-chlorure de cuivre noircissent à la lumière; ainsi, plusieurs composés de ce métal doivent être rangés parmi les matières altérables sous l'influence des rayons lumineux.

J'ai employé le moyen suivant pour obtenir du proto-chlorure de cuivre impressionnable, sur lequel j'ai pu étudier l'action du spectre, comme on le verra dans le chapitre suivant. Voici ce que j'extrais des notes du cahier d'expériences d'octobre 1847. « En exposant une plaque « de cuivre à la vapeur d'acide chlorhydrique, elle prend une légère « teinte, comme si on la couvrait d'un voile blanchâtre. Dans cet état, elle « est couverte de proto-chlorure de cuivre, et à la lumière elle passe ra- « pidement au noir.... ». Les plaques de cuivre exposées aux vapeurs de brome et d'iode changent également de couleur, et même j'ai observé qu'une lame de cuivre chauffée et couverte d'oxyde, lorsqu'elle devient jaunâtre, est assez sensible à la lumière; quand une lame ainsi oxydée est exposée à la vapeur d'acide chlorhydrique, elle devient même très-impressionnable.

MM. Garnier et Salmon (1) se sont occupés de l'action exercée par la lumière sur l'iodure de cuivre préparé par les plaques de cuivre et la vapeur d'iode. M. B. Renault (2) a obtenu des couches de chlorure, bromure, iodure et fluorure de cuivre impressionnables à la lumière en plongeant des lames de cuivre dans des liquides pouvant leur céder du chlore, du brome, de l'iode ou du fluor. D'après les différences de solubilité des sels insolés et non insolés, il a pu conserver des impressions faites sur ces surfaces sensibles.

*Composés de mercure.* — Les oxydes de mercure sont altérés par la lumière, le bioxyde comme le protoxyde; ils perdent probablement de l'oxygène. D'après Davy (3), l'oxyde de mercure obtenu par

(1) *Comptes rendus de l'Acad.* — *Bullet. de la Société de ph.*, t. 13, p. 97.
(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 10, p. 317 et 347.
(3) Davy, *Philosoph. chimique*, ouvrage déjà cité, t. 1, p. 335.

une solution de potasse et le calomel (protochlorure) exposé au spectre change de couleur, et devient rouge dans les rayons rouges en absorbant de l'oxygène ; les rayons violets, au contraire, décolorent l'oxyde rouge de mercure humide. La première réaction est due à la décomposition du protoxyde en bioxyde et en mercure, qui se fait avec la plus grande facilité et qui a lieu tout aussi bien à la chaleur de l'eau bouillante que sous l'influence de la lumière (1). L'expérience peut se faire aisément en plaçant le protoxyde dans un tube comme celui de la figure 44 page 48 et en l'exposant à la lumière; on voit alors que dans le vide comme dans l'air sa teinte noire devient plus claire et passe au jaune par places. Si l'on trempe une feuille de papier successivement dans des solutions de proto-azotate de mercure et de potasse, on forme un dépôt de protoxyde de mercure, qui se décolore un peu à la lumière, mais tout en restant grisâtre.

Quant à l'oxyde de mercure exposé sous l'eau à la lumière solaire, il prend à sa surface une teinte noire; il se dégage, à ce qu'il paraît, des bulles de gaz oxygène (2).

Le protochlorure de mercure s'altère aussi, quoique faiblement; quant au proto-iodure, il est rapidement impressionnable. Une feuille de papier lavée simplement avec une dissolution d'azotate de mercure donne aussi une coloration à la lumière et une réduction métallique.

On a cité la décomposition qui s'opère entre une dissolution d'oxalate d'ammoniaque et de bichlorure de mercure quand le mélange est exposé à la lumière; il y a formation de sel ammoniac, précipitation de protochlorure de mercure (calomel) et dégagement d'acide carbonique. M. Poitevin a reconnu que le mélange de ce même sel de mercure avec l'alloxantine donne au soleil du protochlorure de mercure avec dégagement de gaz (3).

Dans le cours d'expériences faites avec M. Fremy, nous avons observé que l'on avait une action très-nette et très-tranchée, sans dégagement de gaz, en mélangeant une dissolution d'acide oxalique avec une dissolution de bichlorure de mercure. A l'obscurité, ou sous l'influence de la chaleur, les deux liquides ne se troublent pas, et il n'y a pas réaction entre les corps; mais à la lumière solaire, comme à la lumière diffuse, le mélange se trouble aussitôt et un précipité blanc se forme. Ce précipité

(1) Berzelius, *Traité de chimie*, trad. franç., 2e édition, t. 2, p. 497.
(2) *Ibid.*, t. 3, p. 111.
(3) Poitevin, *Traité de l'impression photogr. sans sels d'argent*, p. 134.

est du protochlorure de mercure parfaitement pur. Les proportions qui ont le mieux réussi sont les suivantes : pour 100 gr. d'eau, 6 gr. 5 de bichlorure de mercure et 12 gr. 5 d'acide oxalique. Les deux nombres 6,5 et 12,5 sont sensiblement proportionnels aux équivalents des substances, et ces proportions permettent leur solution complète dans les 100 gr. d'eau à la température ordinaire. Dans le quatrième chapitre de ce livre il sera question de l'emploi de cette substance pour étudier l'intensité des rayons actifs.

Cette réaction indique que sous l'influence de la lumière le bichlorure de mercure est partiellement réduit; le protochlorure formé étant insoluble se précipite aussitôt. Quant à l'équivalent de chlore mis en liberté, il se porte sur un équivalent d'hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique, et l'oxygène correspondant en reagissant sur l'acide oxalique donne de l'acide carbonique, qui reste dans la liqueur et se dégage peu à peu.

Cette action de la lumière sur certaines combinaisons permet de concevoir comment M. Hunt (1) a obtenu des précipités différents en mélangeant à des solutions d'argent ou de mercure, insolées ou non insolées, des sels capables de produire des précipitations; dans le cas des dissolutions insolées, une partie des combinaisons ont dû passer à un état d'oxydation moindre. M. J. Herschell a également montré quelle était l'action de la lumière sur le proto-azotate de mercure isolé ou mélangé à différents sels (2).

*Sels de fer.* — Les sels de peroxyde de fer tendent à passer à l'état de sels de protoxyde et à perdre un équivalent d'oxygène quand ils sont soumis à l'action de la lumière; on peut citer le cyanoferrite, l'oxalate de peroxyde de fer, etc., surtout quand ils sont en présence de corps pouvant s'oxyder et leur enlever un de leurs éléments constituants. Lorsque ces corps sont isolés, ils sont décomposés, mais en faibles proportions, et les réactifs capables de déceler la présence des sels de protoxyde donnent alors des indications sur les effets produits.

Les dissolutions de perchlorure de fer dans l'alcool et l'éther se décolorent à la lumière (3); la dissolution alcoolique laisse précipiter de l'oxyde de fer, et le sel dissous passe à l'état de protocholure si

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 59, p. 373 (1845).
(2) *Philosophical trans.*, 2e partie (1842), p. 181.
(3) Berzelius, *Traité de chimie*, 2e édit. française, t. 3, p. 529.

l'action lumineuse est suffisamment prolongée (1). Lorsque ce sel mélangé avec des combinaisons organiques, comme l'acide oxalique ou l'acide tartrique, se trouve exposé aux rayons solaires, le passage du fer au minimum de chloruration est accompagné d'effets que l'on doit signaler :

Si l'on mélange une dissolution de perchlorure de fer avec une dissolution d'acide oxalique dans une éprouvette que l'on renverse sur un bain de même nature, à l'obscurité on n'obtient aucun effet; mais sous l'influence des rayons solaires il se produit aussitôt un dégagement abondant de gaz acide carbonique, dû à la décomposition de l'acide oxalique; on peut comprendre la réaction en remarquant que l'on a dans le mélange $Cl^3\ Fe + Ho + C^2O^3$, et qu'il vient $Cl\ Fe + Cl\ H + 2\ Co^2$. Mais il est possible qu'avant l'action solaire il se produise du peroxalate de fer, par le fait du mélange et que l'action lumineuse se porte sur ce composé; car M. Draper (2), qui a observé cette réaction, conseille l'emploi d'une dissolution de ce dernier sel, donnant lieu sous l'action de la lumière solaire ou diffuse à un dégagement d'acide carbonique et à une précipitation d'un sous-sel ferrugineux. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet quand il sera question des réactions à l'aide desquelles on peut évaluer la quantité d'action chimique produite par une source lumineuse déterminée.

M. Draper a reconnu la difficulté d'estimer la quantité d'acide carbonique dégagée lors de la réaction de la lumière sur le peroxalate de fer, car une partie de ce gaz reste toujours dissous dans le liquide; il a remarqué que cette dissolution de peroxalate de fer mélangée à du chlorure d'or ne donne aucune précipitation, mais qu'aussitôt que l'action de la lumière a lieu l'or se précipite, par suite de la formation du sel de fer au minimum.

M. Poitevin (3) a observé la réaction curieuse qui a lieu entre le perchlorure de fer et l'acide tartrique : Si l'on fait une dissolution de 12 à 20 parties de perchlorure de fer dans 100 parties d'eau, et de 6 à 10 parties d'acide tartrique dans la même quantité de liquide, en mêlant les deux dissolutions, on a un liquide qui peut se conserver sans altération dans l'obscurité. Étendu sur une feuille de papier ou sur du verre

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 9, p. 145.

(2) *Philosoph. mag.*, sept. 1857. — *Biblioth. univ. de Genève.* — *Archives des sciences physiq.*, t. 36, p. 258 (1857).

(3) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 62, p. 192. — Poitevin, *Traité de l'impression photographique sans sels d'argent*, Paris (1862), page 173.

à l'abri de la lumière, il donne lieu, après l'évaporation, à une couche sèche. Mais si la lumière vient à frapper cette surface, auss tôt les parties qui ont été éclairées deviennent hygroscopiques, et sont aptes à retenir des poussières ou d'autres matières ténues : cet effet provient de la production du protochlorure de fer déliquescent. On verra plus tard que M. Poitevin a utilisé cette propriété pour le tirage des épreuves photographiques positives avec des matières pulvérulentes quelconques, charbon, sanguine, etc. ; il a montré qu'en formant ces images sur papier, on peut en les plongeant dans des disssolutions métalliques qui sont réduites par les sels de fer au minimum, faire apparaître des images. Tel est l'effet des sels d'or qui sont réduits par le protochlorure de fer. L'acide gallique, qui forme de l'encre avec les sels de peroxyde, peut colorer la partie non insolée et laisser intacte la partie insolée ; quant au cyanoferrite de potassium, ou cyanure rouge, il donne à la partie insolée une coloration bleue.

M. Chevreul (1) a reconnu que le cyanure de fer (bleu de Prusse) est décoloré dans le vide et devient blanc sous l'influence de la lumière, et qu'en présence de l'oxygène il reprend sa coloration. Mais ce phénomène ne se produit pas de telle sorte qu'il se reforme le même composé que celui qui a été altéré par la lumière; en effet, dans le vide le bleu de Prusse perd du cyanogène ou de l'acide cyanhydrique, et il ne reprend ensuite que de l'oxygène, en sorte qu'après des expositions multipliées et répétées à la lumière du soleil dans le vide et dans l'air, on réduirait probablement le bleu de Prusse à n'être plus que du peroxyde de fer, mais il faudrait pour cela beaucoup de temps.

M. J. Herschell (2) a montré que le ferrocyanure rouge de potassium, c'est-à-dire le cyanoferrite est impressionnable à la lumière ; il y a formation d'un sel de protoxyde. Si on en imprègne un papier que l'on recouvre ensuite de perchlorure de fer et qu'on l'expose à la lumière, il se forme une teinte bleue, due à la production du cyanure de fer (bleu de Prusse). Cette réaction est facile à expliquer en raison de la réduction des deux sels. Mais il se produit ensuite un effet curieux : si l'action des rayons solaires est suffisamment intense, la trace bleue disparaît et le papier devient blanc, pour se colorer de nouveau en bleu à l'obscurité. Cet effet provient de ce que le cyanure bleu de fer se désoxyde à son tour par l'ac-

(1) *Recherches chimiques sur la teinture. — Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 16 (1838), t. 19, p. 491 (1835), et t. 23, p. 1 (1853).

(2) *Philosoph. transanct.* (1842), 2e partie, p. 181.

tion de la lumière, puis de ce que le nouveau sel reprend sa coloration bleue à l'obscurité en reprenant de l'oxygène.

M. J. Herschell a reconnu également que les sels de fer tels que l'ammonio-citrate et l'ammonio-tartrate éprouvent à la lumière des actions du même genre que le cyanure, et que déposés sur des papiers ils peuvent donner plus ou moins rapidement des impressions colorées. Quand une feuille de papier enduite d'ammonio-citrate de fer est partiellement insolée, puis plongée dans une dissolution d'or ou d'argent, l'or ou l'argent se trouvent réduits sur les parties insolées et donnent des impressions d'une grande netteté. Si la feuille insolée est plongée dans une dissolution de cyano-ferrite de potassium, elle devient bleue par la réduction du sel comme précédemment avec le bichlorure de fer. Du reste, on peut varier beaucoup les effets de couleur obtenus à l'aide des papiers préparés au moyen des composés ferrugineux et d'après les principes précédents.

M. Draper (1) a observé que lorsqu'une feuille de papier, après avoir été placée sur une solution de bleu de Prusse dans l'oxalate d'ammoniaque, est exposée à l'action de la lumière sous un cliché photographique, on voit les portions qui en subissent l'influence acquérir une légère coloration bleue. Si la feuille est ensuite lavée avec de l'eau, puis immergée dan sde l'acide chlorhydrique étendu, cette impression faible devient extrêmement intense. Une fois l'excès d'acide enlevé par des lavages et le papier desséché, l'image obtenue disparaît promptement sous l'action de la lumière, pour reparaître à l'obscurité.

*Sels d'uranium.* — Les sels d'uranium donnent des effets du même genre que les composés de mercure et de fer. L'azotate d'urane, qui est un azotate de peroxyde, passe à l'état de sel de protoxyde sous l'influence lumineuse, et peut donner lieu aux mêmes effets que les sels précédents. Ainsi l'azotate d'urane dissous dans l'alcool conserve sa couleur jaune à l'obscurité, mais laisse déposer du protoxyde d'urane vert sous l'influence des rayons solaires.

Une feuille de papier recouverte d'une couche de ce même sel, puis desséchée, exposée à la lumière, donne une impression faible; mais plongée alors dans une dissolution d'un sel d'or, d'argent ou dans du cyano-ferrite de potassium, elle indique par un dépôt d'or, d'argent, ou de cyanure de fer, la désoxydation opérée par la lumière.

*Composés de chrome.* — L'acide chromique réagit comme oxydant sur

(1) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 7, p. 269.

un grand nombre de substances sous l'influence de la lumière, il cède une partie de son oxygène, et passe à un état d'oxydation moindre. Cet effet a été observé par M. Ponton (1), et j'ai indiqué quelques-unes des réactions que l'on peut obtenir avec cette matière (2). Cet acide dissous dans l'alcool puis soumis à l'action des rayons solaires donne lieu à une précipitation d'oxyde hydraté de chrome; en agissant sur l'amidon, le sucre, la gomme et d'autres matières organiques, il produit des effets analogues.

Habituellement, au lieu d'acide chromique, on emploie les bichromates de potasse ou d'ammoniaque, qui agissent par leur excès d'acide et passent à l'état de chromates neutres. Ainsi une feuille de papier enduite de bichromate de potasse, quand elle est sèche, se colore rapidement en brun à la lumière en vertu de la réaction indiquée plus haut.

C'est sur cette propriété de l'acide chromique agissant sur la gomme ou l'albumine que repose le procédé de lithophotographie découvert par M. Poitevin, et sur l'insolubilité communiquée à la gélatine par le même composé que M. Talbot a basé un procédé de gravure photographique dont il sera question dans le livre III de ce volume.

On pourrait encore citer beaucoup d'autres exemples de l'action chimique produite par la lumière, et on verrait qu'en général l'effet qui a lieu sur les sels métalliques est une réduction partielle ou totale avec ou sans l'influence de substances organiques. D'autres composés peuvent également subir une action analogue; ainsi des substances organiques, même hors de la présence de l'oxygène, peuvent être décomposées, comme on l'observe avec le curcuma, qui, d'après ce que l'on a vu page 58, peut se décolorer dans le vide à la lumière; l'acide azotique, sous l'influence des rayons solaires, se décompose en oxygène et en acide nitreux, et j'ai observé qu'une feuille de papier enduite d'une légère couche d'eau fortement acidulée par l'acide sulfurique se colore un peu à la lumière, ce qui tendrait à montrer qu'il se manifeste une réaction entre la matiere organique et une partie de l'oxygène de l'acide sulfurique. Mais les exemples précédents suffisent pour montrer quel est le mode d'action de l'agent lumineux et combien sont nombreuses les circonstances dans lesquelles on observe son influence (3).

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. 23, p. 414.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 469 (1840).

(3) On peut consulter à ce sujet un ouvrage de M. Landgrebe intitulé : *Ueber die chemischen und physiologischen Wirkungen der lichtes*; Marbourg, 1834.

### § 4. *Effets chimiques continués après l'influence lumineuse. Rayons continuateurs.*

Certains effets chimiques dus à l'action de la lumière une fois commencés peuvent être continués dans l'obscurité, soit sans aucune action extérieure, soit par l'emploi de certains réactifs ou par l'influence de la chaleur ou de la lumière.

Seebeek a observé que si l'on enduit un papier à l'aide d'une dissolution de chlorure d'or, une fois desséché il ne change pas de couleur à l'obscurité; mais si après une exposition assez courte aux rayons solaires, alors que la partie insolée ne montre qu'une coloration à peine sensible, on le rentre dans l'obscurité, la réduction de l'or a lieu et le papier passe par différentes phases qu'il aurait prises sous l'influence lumineuse. J'ai pu constater ce résultat en employant du chlorure d'or neutre, et M. J. Herschell, dans le mémoire cité plus haut, a observé des effets analogues avec diverses préparations de sels d'or. Parmi les sels métalliques impressionnables, ce sont du reste les composés d'or qui montrent peut-être le plus nettement les effets de ce genre.

On a des exemples d'autres effets chimiques qui une fois commencés se continuent d'eux-mêmes à l'obscurité; tels sont, d'après M. Regnault (1), les résultats de l'action du chlore sur l'éther chlorhydrique et sur l'alcool. Suivant M. Draper (2), l'eau chlorée exposée pendant quelque temps à la lumière, puis rentrée dans l'obscurité, continuerait à laisser dégager du gaz oxygène; mais il faudrait s'assurer que ce dernier gaz ne proviendrait pas de la réaction chimique opérée sous l'influence de la lumière et n'aurait pas éprouvé un simple retard de dégagement.

Les différentes méthodes photographiques sont fondées sur des effets très-remarquables, qui doivent se ranger dans la même classe de phénomènes : la réaction découverte par Daguerre, et qui forme la base de sa magnifique invention, consiste, en ce qu'une plaque d'argent recouverte d'iodure par son exposition à la vapeur d'iode, et exposée pendant un temps suffisant au foyer d'une chambre noire, n'offre pas l'image de celle-ci d'une manière appréciable, mais elle la possède à l'état latent; en effet, si la lame est exposée à la vapeur du mercure, l'image apparaît par suite de la fixation du mercure sur les parties frappées par

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 71, p. 355 (1839).
(2) *Philos. mag.*, nov. 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 59, p. 365.

la lumière. La manière la plus simple d'expliquer ce phénomène consiste à admettre que dans les parties insolées, alors que l'effet n'est pas possible à distinguer par la vision, l'iodure est changé en sous-iodure, et que sous l'action du mercure il y a décomposition du sous-iodure en iodure et en argent métallique; l'argent s'amalgame avec le mercure et produit les blancs de l'image. Un lavage ultérieur dans l'hyposulfite de soude enlève tout l'iodure d'argent qui restait sur la lame.

Le temps nécessaire pour impressionner la lame d'argent iodurée est excessivement court, et sous l'action de la lumière solaire c'est par fractions de seconde qu'il faut compter pour ne pas dépasser ce temps; bien plus, quand la lame recouverte d'iodure est exposée pendant peu de temps à la vapeur de brome, on peut rendre la surface 60 fois plus sensible encore. Il n'y a pas de matière chimiquement impressionnable d'une sensibilité plus grande que la lame d'argent iodurée puis bromurée. D'après cette explication, des traces d'argent que l'œil ne peut distinguer suffisent pour déterminer la fixation du mercure dans les parties qui ont été insolées.

La lumière seule peut produire le même effet que la vapeur du mercure, et certains rayons qui n'auraient pas exercé d'action dans des conditions ordinaires peuvent continuer une action commencée par d'autres. J'ai été conduit à ces résultats curieux (1) en étudiant l'action du spectre solaire sur les matières impressionnables et en observant que l'iodure d'argent préparé sur les plaques métalliques, ainsi que le chlorure, l'iodure et le bromure de même métal obtenus sur papier avec excès d'azotate d'argent, substances qui ne sont sensibles que depuis le bleu jusqu'au delà du violet prismatique quand elles ont été préparées à l'obscurité, deviennent impressionnables depuis le bleu jusqu'au rouge quand elles ont reçu préalablement un commencement d'action, c'est-à-dire lorsqu'elles se trouvent dans des conditions telles qu'exposées à la vapeur de mercure, ou à l'influence des sels réducteurs, elles auraient fait apparaître une image. Au lieu d'opérer avec le spectre solaire, on peut employer des écrans de verre coloré; on observe alors qu'un verre jaune ou rouge tamise la lumière de façon à ce que les rayons transmis peuvent continuer l'action commencée sur les composés d'argent cités

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, p. 702 (1840). — *Mém. des savants étrangers*, t. 8, p. 373. — *Ann. de Chimie et de physique*, 3e série, t. 9, p. 257 (1843). — Voir aussi le rapport de M. Biot à l'Académie des sciences sur ce travail, *Comptes rendus de l'Academie*, t. 12, p. 101.

plus haut, mais ne peuvent la commencer eux-mêmes. De là la dénomination de *rayons continuateurs*, que j'avais donnée à ces rayons peu réfrangibles, et de *rayons excitateurs* appliquée aux rayons les plus réfrangibles; mais ces dénominations ne sont pas nécessaires, car il n'y a de différence entre eux que la réfrangibilité ou la longueur d'onde; ainsi au delà d'une certaine longueur d'onde des rayons incidents les effets chimiques sont commencés et continués; pour une longueur d'onde moindre, la continuation seule a lieu.

Cette continuation des phénomènes chimiques par l'action de la lumière est très-remarquable; elle est telle que sous les verres jaunes une image commencée sur une plaque daguerrienne, et qui est encore latente, vient d'elle-même sous l'action des rayons solaires qui ont traversé cet écran coloré, et la réduction de l'argent métallique dans les parties insolées donne du blanc comme l'aurait fait la vapeur du mercure, en sorte qu'à l'aide de la lumière seule on peut obtenir une image de la chambre noire. M. Gaudin, qui, sur mes indications (1), a employé les verres colorés à la reproduction des images daguerriennes en avait obtenu de forts bons résultats.

Peu de temps après la publication de ces récherches, M. Majocchi (2) a annoncé qu'au moyen de la chaleur il pouvait continuer des effets chimiques commencés sur des papiers de bromure d'argent sous l'action de la lumière. La chaleur produirait donc, dans certaines limites, des effets semblables à ceux que la lumière ainsi que certains réactifs chimiques peuvent manifester. On a dit que la chaleur pouvait donner lieu à la production d'images en plaçant en contact, dans l'obscurité, des papiers sensibles et des gravures dont on avait élevé la température (3); mais, dans cette circonstance, l'action réductrice des matières qui se trouvent en présence des sels métalliques, action qui est activée par l'élévation de température, semble pouvoir expliquer les effets observés.

Deux ans environ après la publication de la découverte de Daguerre, M. Talbot (4) fit connaître une réaction chimique conduisant au même résultat que l'action de la vapeur de mercure et celle des rayons les moins réfrangibles; elle forme la base des procédés photographiques sur papier aujourd'hui en usage. Voici en quoi elle consiste : lors-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 12, p. 862 et 1060.
(2) *Ann. de physique, chim. et math. de Florence*, sept. 1841.
(3) *Bulletin de la Société phot.*, tome 5, p. 177 (1859).
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 12, p. 1055 (1841).

qu'une feuille de papier est recouverte d'un sel d'argent sensible à la lumière, comme l'iodure d'argent obtenu par double précipitation avec excès d'azotate (1), en la plaçant au foyer de la chambre noire elle ne donnerait une image qu'au bout d'un temps plus ou moins long. Mais si au bout de quelques instants on vient à la déplacer et à l'examiner dans l'obscurité en s'éclairant d'une lumière rouge ou jaune, on ne trouve aucune trace de l'image; en la plongeant alors dans une dissolution d'acide gallique et en échauffant le liquide, on voit peu à peu apparaître l'image, comme si le temps d'exposition à la chambre noire eût été beaucoup plus prolongé. Les parties insolées deviennent noires, c'est-à-dire qu'il se produit, comme on sait, une image négative.

On obtient le même résultat en substituant au papier une lame de verre recouverte de gélatine, d'albumine ou de collodion sur laquelle on a déposé soit une couche simple d'azotate d'argent, soit de chlorure, bromure ou iodure avec excès d'azotate; on peut alors plonger cette lame partiellement insolée dans une dissolution réductrice d'acide pyrogallique, de protosulfate de fer, de protochlorure d'étain, substances qui agissent dans le même sens que l'acide gallique, quoiqu'en donnant des teintes différentes à l'argent déposé sur les parties insolées de l'image.

Dans cette circonstance, le dépôt d'argent dans le bain réducteur ne paraît pas en rapport avec l'action chimique commencée sur le sel d'argent, et semble beaucoup plus considérable que celle qui correspondrait à la partie influencée de la surface impressionnable; et même, d'après les observations de M. Davanne (2), quand le bain réducteur renferme un sel soluble d'argent, d'azotate d'argent par exemple, la réduction de l'argent fait fixer sur les parties insolées beaucoup plus d'argent que la couche sensible n'en renfermait avant son impression. Dans une expérience, une lame de verre collodionnée qui ne renfermait que 25 milligr. d'argent à l'état d'iodure, en a donné 160 millig., c'est-à-dire 6 fois plus après son exposition à la lumière et son immersion dans l'acide gallique. Il semble donc que la surface impressionnée sur laquelle toute trace de décomposition chimique est inappréciable pour l'œil, contient cependant de très-faibles quantités d'ar-

(1) Voir pour l'influence de l'excès d'azotate ce qui a été dit plus haut page 63 et le livre III relatif à la photographie.

(2) *Bulletin de la Société photographique*, t. 3, p. 131.

gent, qui dans le bain réducteur fixent le métal provenant de la réduction du sel dissous. La surface impressionnée, ou du moins les faibles quantités de sous-sel d'argent qui s'y trouvent, joueraient donc un rôle analogue, par rapport au mélange du sel réducteur et de la dissolution d'argent, que les parcelles d'éponge de platine par rapport aux matières dont elles déterminent les combinaisons et les décompositions. On explique même ainsi comment une image photographique faible de ton peut être renforcée en la plongeant à différentes reprises dans des bains contenant des sels réducteurs mélangés de sels d'argent. On se borne, quant à présent, à ces indications, ce sujet devant être développé plus loin dans un des chapitres du livre III, relatif à la photographie.

Des effets du même genre peuvent se produire avec d'autres sels métalliques : ainsi, j'ai remarqué qu'une feuille de papier recouverte de chlorure d'or et partiellement impressionnée, étant plongée rapidement dans une solution étendue d'acide oxalique dont la température est de 40 où 50°, puis lavée dans l'eau, prend une coloration violette, due à la réduction de l'or dans les parties qui avaient commencé à se colorer sous l'influence de la lumière.

# CHAPITRE II.

## Effets produits par les rayons différemment réfrangibles.

### § 1. *Effets du spectre solaire sur les matières impressionnables.*

Les effets produits par la lumière sont si variés qu'il est nécessaire d'examiner comment chaque matière sensible se comporte sous l'influence des rayons différemment réfrangibles, et l'on va voir que si quelques principes généraux peuvent résulter de cet examen, cependant on peut dire que chaque substance est un instrument à l'aide duquel on doit interroger le rayonnement lumineux, et qu'il y a autant d'effets différents que de substances impressionnables.

En général les effets chimiques ont lieu dans les rayons les plus

réfrangibles du spectre solaire et même dans la partie ultra-violette, et l'on a pu voir tome Ier, page 31, ainsi que page 45 de ce volume quelles avaient été les premières observations de Schéele et de Ritter sur le chlorure d'argent; on a vu également tome Ier, livre IV, page 138 (1), que j'avais été conduit à observer, à l'aide des actions chimiques, les mêmes raies noires que celles du spectre visible, même au delà du violet; ainsi les différences observées proviennent seulement des matières inégalement impressionnables. Examinons quels sont les effets que présentent la plupart des matières qui ont été indiquées dans les chapitres précédents.

Afin d'agir avec des rayons lumineux d'une réfrangibilité bien définie, on fait réfléchir un faisceau de rayons solaires sur le miroir métallique d'un héliostat, et l'on introduit ce faisceau dans une chambre obscure par une fente verticale très-étroite dont on peut faire varier le diamètre depuis 0 mill. 1 jusqu'a 2 mill. : A la distance de 2 mètres environ de l'ouverture, sur le trajet des rayons, on place un prisme de flint glass très-blanc et très-pur, d'un angle de 60° et dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens; immédiatement derrière le prisme on fixe, perpendiculairement aux rayons réfractés, une lentille achromatique de 1 mètre de foyer, et l'on reçoit le spectre, sur un carton blanc à 2 mètres à peu près de la lentille. On a un spectre solaire bien étalé et dans lequel on distingue les raies noires. Quand on fait usage de substances très-impressionnables, il est nécessaire d'agir avec un spectre d'une certaine étendue, de 1 à 2 décim. de longueur entre les raies A et H par exemple; comme on peut faire varier la distance de la lentille et du prisme, et employer une lentille à plus court foyer, on peut augmenter ou diminuer la grandeur du spectre. Avec les matières très-peu impressionnables il faut se servir d'un spectre de 5 à 6 mill. de hauteur sur 30 à 35 mill. de longueur entre les raies A et H.

Je supposerai qu'on ait employé un prisme de flint glass très-blanc; avec le quartz, comme on l'a vu dans le Ier volume, page 140, on a un spectre un peu plus long pour la partie ultra-violette; mais la dispersion est moindre et la différence entre les effets observés avec les rayons les plus réfrangibles et ceux que présente un prisme de flint blanc sont assez faibles, eu égard aux indications générales qui vont être données, pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en faire usage.

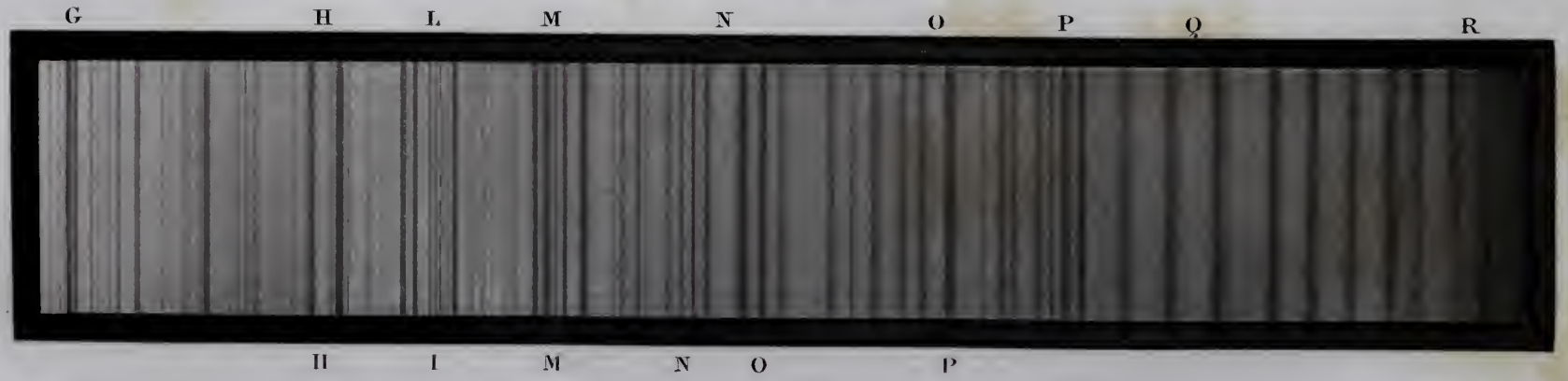
(1) *Biblioth. univ. de Genève*, t. 40, p. 341 (1842).

# RAIES DU SPECTRE SOLAIRE

Fig. 15

partie lumineuse colorée

partie violette et ultra-violette
*Obtenue photographiquement*




Imprimerie Chatain

Dulos sc

Lorsqu'on veut avoir un spectre bien épuré et éliminer autant que possible dans la chambre noire la plus grande partie de la lumière diffuse, qui viendrait influencer les matières sur lesquelles on opère, on doit avoir recours à une disposition représentée fig. 38, tome Ier, page 335 : on place en avant du volet de la chambre noire par où le faisceau de rayons pénètre une boîte en bois noircie de 50 à 60 centimètres de longueur, qui porte sur le prolongement de la route du faisceau lumineux une seconde ouverture longitudinale comme celle qui est faite au volet. De cette manière le faisceau pénètre dans la chambre par deux ouvertures longitudinales distantes de 60 centim., et les parois de la boîte arrêtent les rayons diffusés obliquement qui se seraient introduits par la première ouverture. Cette disposition n'élimine pas toute la lumière diffuse, car la lentille et le prisme en donnent encore quelques traces, mais à l'aide d'écrans percés d'ouvertures longitudinales, et que l'on place devant les substances impressionnables, on s'en affranchit en grande partie.

Afin de se guider dans les descriptions qui vont suivre et reconnaître les positions des parties actives de l'image prismatique, on place de nouveau ci-contre la planche fig. 13, où se trouvent les principales lignes non-seulement de la partie lumineuse du spectre solaire, mais encore de la portion ultra-violette, lignes qui ont été décrites tome Ier, page 138.

*Phosphore.* — La coloration rouge du phosphore a lieu rapidement à la lumière violette, comme on l'a vu page 47; mais les limites d'action dans l'image prismatique n'ont pas été indiquées d'une manière aussi précise qu'avec les substances dont on va parler ci-après. La disposition employée par M. Draper pour cette étude est assez simple (1) : elle consiste à couler le phosphore entre deux plaques de verre et à exposer cette lame mince à l'action de lumière; le sulfure de carbone et les dissolvants du phosphore blanc enlèvent ensuite la partie non impressionnée, et le phosphore rouge insoluble reste sur le verre. Il a pu obtenir ainsi des images photographiques de la partie la plus réfrangible du spectre avec ses raies.

*Chlore et hydrogène.* — La combinaison du chlore et de l'hydrogène a lieu sous l'influence des rayons les plus réfrangibles, et principalement des rayons violets et ultra-violets; elle ne se produit pas dans le rouge prismatique. Parmi les expérimentateurs qui se sont occupés de cette

(1) *Bulletin de la Société. photogr.*, t. 8, p. 17.

étude, on peut citer MM. Bérard (1), Draper (2), Fabre et Silbermann (3), Bunsen et Roscoe (4). D'après MM. Fabre et Silbermann, le maximum d'action aurait lieu entre les raies G et H du spectre solaire à un tiers environ de GH près de G, c'est-à-dire dans la partie que l'on appelait autrefois l'indigo du spectre; suivant MM. Bunsen et Roscoe, ce maximum serait plus près de H que de G, et même après H il y aurait un second maximum d'action, de sorte que la courbe des intensités qui, étant tracée le long du spectre, indiquerait la quantité d'action chimique produite dans un temps donné, après s'être élevée à l'endroit du maximum, s'abaisserait près de H pour se relever vers I et présenter comme un second maximum, moins fort que le premier.

L'action chimique, d'après ces derniers observateurs, nulle depuis le rouge extrême jusqu'en C, dans l'orangé, commence à être sensible dans le jaune en D; elle est encore faible dans le vert, et elle ne se fait sentir avec un peu plus de force que dans le bleu vers F, où elle est au moins six fois plus faible que dans la position du maximum. Elle est très-forte dans le bleu, le violet et jusque bien au delà du violet vers N, où elle recommence à décroître jusqu'aux limites les plus éloignées du spectre. Ces effets exigent que le spectre soit pur et que les divers rayons ne se mélangent pas, sans quoi les limites sont un peu différentes et les rapports des intensités peuvent changer.

*Combinaisons d'argent.* — L'action des différents rayons sur les combinaisons d'argent va permettre de reconnaître quels sont les divers effets produits suivant la nature des sels et leur état physique ainsi que selon la longueur d'onde des rayons actifs.

Examinons d'abord l'effet observé sur le chlorure d'argent; si ce composé est formé par double précipitation et est parfaitement lavé, en l'étendant dans un lieu bien obscur sur une surface inactive comme du verre, de la porcelaine et même à l'aide d'une couche de gomme arabique sur du carton, puis en projetant sur sa surface un spectre solaire bien épuré, on voit que la coloration commence en dehors du violet et au bout d'un certain temps s'étend d'un côté presque jusqu'au bleu et de l'autre dans la partie ultra-violette. Pour que l'effet soit facile à observer, il faut un spectre de petite dimension, car la matière est peu

(1) *Mém. de la Société d'Arcueil*, t. 3.
(2) *Philos. Mag.*, juillet 1844. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 53.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3me série, t. 37, p. 297.
(4) *Ann. de Poggend.*, t. 108, p. 267 (1859).

impressionnable et on n'a pas une image aussi promptement qu'en faisant usage des préparations sur collodion ou des lames d'argent iodurées. La figure 45 représente, en même temps que la position des principales raies d'un spectre solaire avec un prisme de flint, l'étendue des parties actives sur différentes substances :

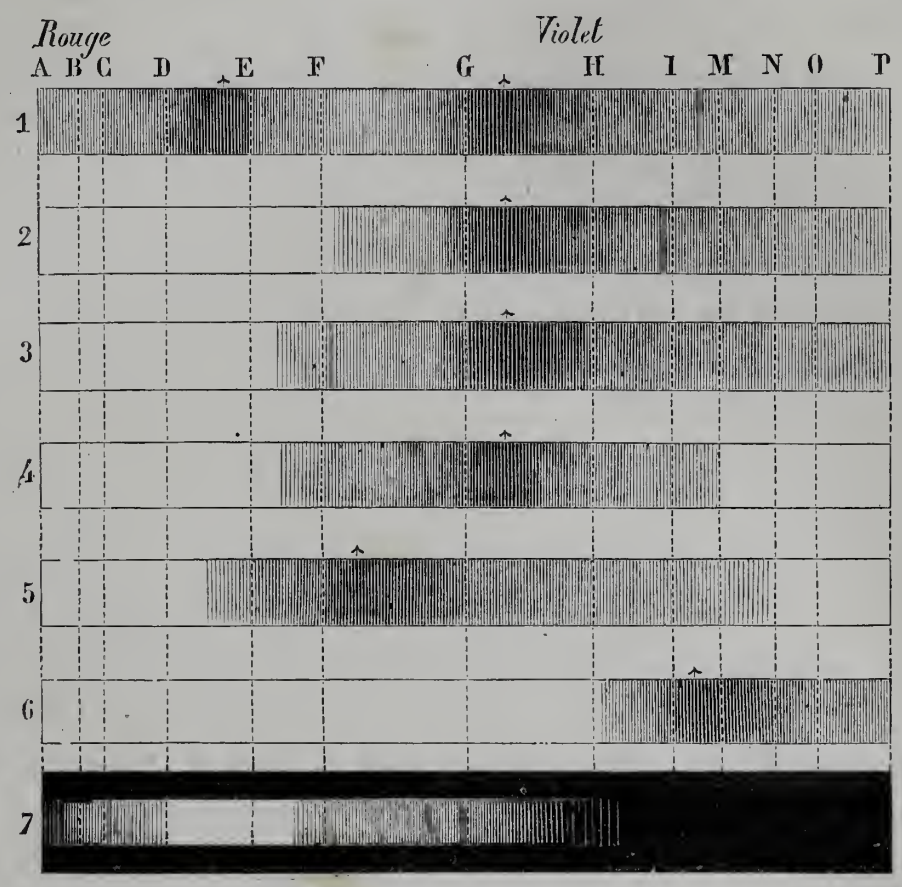



Fig. 45.

N° 1 plaque d'argent iodurée (couche jaune d'or), insolée pendant quelques instants.

N° 2 papier ou collodion enduit d'iodure ou de chlorure d'argent avec excès d'azotate d'argent, non insolé. Surface sèche.

N° 3 papier ou collodion enduit de bromure d'argent avec excès d'azotate d'argent, non insolé. Id.

N° 4 papier enduit de chlorure d'or neutre. Id.

N° 5 papier enduit de bichromate de potasse. Id.

N° 6 papier enduit d'une dissolution de gaïac dans l'alcool. Id.

N° 7 papier enduit d'une dissolution de gaïac, préalablement coloré en bleu par un lavage dans l'eau chlorée. Id.

Si la surface de chlorure d'argent a été primitivement colorée par la lumière, mais très-légèrement, et que l'on vienne à faire agir le spectre sur cette surface un peu insolée, on voit une image violette se former dans le violet et dans l'ultra violet, comme si l'insolation n'avait

pas eu lieu ; mais en même temps une légère coloration rose apparaît à l'extrême rouge; vers le jaune le chlorure déjà coloré se décolore légèrement, puis il semble qu'une trace de bleu se fait sentir près de l'endroit où le chlorure se colore avec intensité. On verra dans le quatrième chapitre du livre suivant que ces effets dépendent de l'influence exercée par la lumière sur la petite quantité de sous-chlorure violet que l'insolation préalable avait formé sur le chlorure blanc.

Au lieu de préparer le chlorure d'argent comme on vient de le dire, on peut l'obtenir par double précipitation à la surface d'une feuille de papier, en déposant sur celle-ci une légère couche d'une dissolution de chlorure de sodium avec un pinceau ou en plongeant la feuille dans une dissolution aqueuse contenant 8 à 10 pour 100 de chlorure (eau 100, chlorure 8 ou 10); une fois la couche sèche, on plonge la feuille de papier dans une dissolution aqueuse d'azotate d'argent contenant 10 pour 100 d'azotate; alors le chlorure d'argent se trouve en présence d'un excès d'azotate (1), et il peut présenter les effets suivants :

Quand la surface a été préparée dans un endroit parfaitement obscur et qu'on l'expose dans le spectre solaire, au bout d'un temps qui dépend de l'intensité des rayons du spectre et par conséquent de la grandeur de l'image, on distingue une impression qui commence entre les raies G et H et ne s'étend que jusqu'en F dans le bleu, puis de l'autre va bien au delà du violet visible jusque vers P. Mais si le chlorure, après avoir été préparé dans une chambre parfaitement obscure, est exposé préalablement pendant un temps très-court à la lumière diffuse ou solaire, de manière à ce qu'il ne soit pas noirci, mais qu'un très-faible commencement d'action ait eu lieu, lorsqu'on vient ensuite à l'exposer dans le spectre solaire, on aperçoit non-seulement une coloration vers le violet extrême, mais on reconnaît qu'une action se manifeste en même temps dans la partie la moins réfrangible du spectre jusqu'au rouge, de sorte que l'espace noirci se trouve dans toute l'étendue du spectre lumineux et bien au delà du violet. Le n° 1 de la figure 45, et qui est relatif à une plaque d'argent ioduré, indique à peu près les limites des effets produits dans cette circonstance.

D'après le mode d'action de la lumière relativement à cette sub-

(1) Voir chapitre précédent, page 63. — *Comptes rendus*, t. 11, p. 702. — *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, t. 9, page 257. — *Savants étrangers*, t. 8, p. 373. — Rapport de M. Biot à l'Académie des sciences sur ces phénomènes, *Comptes rendus*, t. 12, p. 101.

stance, et ainsi qu'on l'a vu dans le chapitre précédent, page 76, j'avais nommé les premiers rayons, les rayons violets, rayons excitateurs et les autres rayons rayons continuateurs; cela signifiait que, suivant la longueur d'onde des rayons ils se comportaient comme excitateurs par rapport à cette matière ou uniquement comme continuateurs. On pourrait aussi exprimer ce fait en disant que la substance, une fois qu'elle a reçu un commencement d'impression, est pour ainsi dire une autre substance impressionnable et se trouve impressionnée entre d'autres limites de réfrangibilité.

Si l'on exposait au spectre solaire le chlorure préparé, suivant la dernière méthode, dans une chambre parfaitement obscure et sans l'impressionner avant l'expérience, on ne verrait d'abord qu'une action dans les rayons les plus réfrangibles; mais au bout d'un temps assez long on finirait par observer un effet dans les régions les moins réfrangibles. Cela tient uniquement à ce que le spectre, même le mieux épuré que l'on puisse avoir, est toujours accompagné d'un peu de lumière diffuse, qui finit par impressionner la surface quand la durée de l'exposition est suffisante. Ainsi, lorsque le chlorure a été primitivement impressionné, l'étendue de la partie colorée se trouve depuis le rouge jusque bien au delà du violet; mais il y a deux maxima d'intensité d'action, l'un entre G et H près de G, l'autre entre D et E vers le jaune, ce dernier correspondant à l'action continuatrice.

On voit, d'après les différentes expériences citées ci-dessus, et ainsi qu'on l'a dit dans le premier chapitre, page 63, que le chlorure d'argent mélangé à l'azotate est non-seulement plus impressionnable, mais devient sensible à l'action des rayons les moins réfrangibles dans des circonstances déterminées; la présence de l'azotate doit donc influer autrement qu'en présentant à chaque instant à la lumière une nouvelle quantité de chlorure non impressionné.

Le bromure d'argent se comporte comme le chlorure, et l'on obtient les mêmes effets, si ce n'est que l'action quand la surface n'a pas été préalablement impressionnée s'étend un peu plus loin du côté le moins réfrangible jusque dans le vert du spectre; le n° 3 de la figure précédente indique cette extension. Mais quand ce composé est obtenu par double précipitation et bien lavé, et qu'il a été primitivement impressionné, il n'offre jamais les traces de couleur rouge vers le rouge et verdâtre dans le vert, comme le chlorure. Nous verrons en effet dans le quatrième chapitre du livre suivant que le sous-chlorure d'argent est

le seul corps jusqu'ici qui jouisse de la propriété de reproduire les couleurs du spectre.

Lorsque le bromure d'argent est préparé par double décomposition sur du papier, en appliquant d'abord sur la surface une couche d'une dissolution de bromure de potassium, puis en imprégnant cette surface quand elle est sèche avec de l'azotate d'argent, le bromure est formé en présence d'un excès d'azotate d'argent, et on observe des effets analogues à ceux que présente le chlorure dans de semblables conditions. Quand cette surface sensible n'a pas été insolée, en la plaçant dans le spectre solaire on a une impression qui commence entre les raies G et H, près de G, et s'étend peu à peu d'un côté au delà de F, de l'autre jusqu'à la limite extrême de l'ultra-violet; si la surface a été primitivement insolée, on reconnaît en outre un effet de continuation depuis le vert jusqu'au rouge, comme avec le chlorure.

L'iodure d'argent précipité et lavé n'est pas impressionnable, comme on l'a vu antérieurement, page 64; mais préparé par double décomposition sur une feuille de papier avec excès d'azotate, il se comporte comme le chlorure et le bromure. L'effet produit sur la surface non insolée ne s'étend pas aussi loin près du vert, et les limites d'action sont les mêmes que celles observées avec le chlorure (voir n° 2, fig. 45); lorsque la surface a été insolée, elle donne lieu à des effets de continuation jusqu'au rouge comme avec les deux autres composés.

Quand on prépare du collodion renfermant isolement soit du chlorure, du bromure, ou de l'iodure de potassium dans les proportions ordinaires et comme il sera dit livre IV, en traitant de la photographie, mais de façon à ce que chaque composé se trouve en présence d'un excès d'azotate d'argent, en exposant ensuite des lames de verre enduites de ces couches encore humides, et non impressionnées à l'avance, à l'influence du spectre solaire, puis en développant les images au moyen du sulfate de fer ou de l'acide pyrogallique, on obtient les résultats suivants :

Avec le collodion contenant du chlorure ou de l'iodure d'argent, les limites d'action sont à peu près les mêmes et les maxima paraissent occuper les mêmes positions ; l'action commence à se manifester entre G et H, près de G, à un tiers à peu près de la distance GH, et l'image prismatique s'étend d'un côté entre G et F, à moitié distance de FG, et de l'autre jusqu'à la limite de l'ultra-violet en P, et même au delà. Avec le bromure d'argent, le maximum d'action est à peu près à la même

place, mais l'image se prolonge jusque dans le commencement du vert, c'est-à-dire jusque près de E.

On verra ci-après qu'avec les plaques d'argent iodurées puis exposées à la vapeur de brome, ou à l'action du chlore, on observe des images prismatiques de même étendue qu'en faisant usage des papiers sensitifs et des surfaces collodionnées : le chlorure et l'iodure d'argent sont impressionnables à peu près entre les mêmes limites de réfrangibilité, mais le bromure présente une extension plus grande du côté le moins réfrangible du spectre lumineux.

L'action de l'iodure de potassium sur l'argent métallique sous l'influence de la lumière donne lieu à la formation d'iodure d'argent, par la décomposition de l'iodure de potassium; ainsi un papier sensitif d'un sel d'argent préalablement coloré à la lumière, puis lavé, étant humecté d'une faible dissolution d'iodure de potassium, blanchit sous l'action des rayons lumineux; ce papier donne ce que l'on appelle des images positives. L'action du spectre solaire sur un papier préparé de cette manière, d'après M. J. Herschell (1), conduit aux résultats suivants :

Si le papier noirci a été recouvert d'une faible solution d'iodure de potassium, il blanchit dans la partie bleue du spectre; ainsi l'argent divisé, qui noircissait le papier, devient ioduré, et en présence d'un iodure alcalin ne se colore plus à la lumière. En même temps que l'on observe cette décoloration de la surface dans la partie la plus réfrangible, on voit le papier continuer à noircir dans le rouge et même au delà, et entre cet espace noirci et la partie qui s'est décolorée, il y a une ligne qui reste neutre. Si l'on couvre le papier noirci d'une nouvelle couche d'iodure de potassium, il commence à blanchir dans la partie la moins réfrangible, et la ligne neutre se rapproche du rouge; avec une solution d'iodure suffisante, le papier blanchit depuis le violet jusqu'au rouge. Enfin avec une très-forte solution d'iodure, le papier blanchirait même à l'obscurité, tant est active l'action de l'iodure de potassium sur l'argent métallique.

A l'aspect des images précédentes il semble qu'il y ait deux actions inverses de produites sur le papier préalablement coloré à la lumière : destruction de la couleur dans le violet, augmentation dans le rouge. Mais il faut remarquer que l'on n'observe que la résultante de plusieurs

(1) *Philosoph. transact.*, 1840, § 5, art. 94 ; *idem*, 1842, art. 214.

actions chimiques simultanées : 1° action de la lumière sur l'iodure d'argent qui a commencé à se colorer, action qui a lieu dans la partie rouge du spectre ; 2° décomposition de l'iodure de potassium dans la partie violette de l'image prismatique ; 3° ioduration de l'argent provenant du sous-iodure formé par la première réaction, c'est-à-dire tendance à la décoloration dans les rayons rouges. Suivant l'énergie de ces réactions, la ligne neutre se rapproche donc plus ou moins du rouge ou du bleu, et les étendues des impressions blanches et noires dans le spectre sont différentes. Ainsi ces apparences diverses tiennent à plus sieurs réactions simultanées dont chacune peut devenir prédominante.

L'iodure d'argent formé à la surface d'une lame d'argent est très-propre à mettre en évidence les deux actions excitatrices et continuatrices indiquées plus haut, page 84, en même temps qu'il manifeste d'autres effets très-curieux observés également avec des papiers impressionnables.

Pour distinguer ces divers effets, il faut opérer avec une lame d'argent exposée simplement à la vapeur d'iode, et de façon à avoir la teinte jaune d'or. Si la lame a été iodée dans l'obscurité, en projetant sur sa surface et pendant un temps suffisant l'image d'un spectre parfaitement épuré, puis en exposant la lame à la vapeur de mercure, on a une impression, comme on l'a dit plus haut à propos des papiers et des verres collodionnés, dont le maximum est situé entre G et H, près de G, à peu près à un tiers de la distance GH; cette impression s'étend entre G et F en s'arrêtant brusquement avant cette ligne F, et va de l'autre côté jusque vers P. Quand la durée de l'action lumineuse n'a pas été trop grande, l'image est blanche par rapport au fond de la plaque et les raies noires se dessinent en noir sur le fond plus clair de l'impression prismatique (1). Lorsque la durée de l'action du spectre est plus grande, après l'exposition de la lame à la vapeur de mercure l'épreuve est dite solarisée dans les points où l'action lumineuse a été très-forte; dans ce cas, le mercure ne produit pas la teinte blanche primitive, et en s'étendant sur la plaque donne une couleur brune, due à son aspect miroitant. Mais dans l'une ou l'autre circonstance l'action a lieu entre les mêmes limites du spectre.

Lorsque la lame iodurée, avant d'être exposée au spectre, a été légèrement impressionnée à la lumière diffuse pendant une ou deux secondes au

(1) Ed. Becquerel, *Biblioth. univ. de Genève*, t. 40, p. 141. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 265.

plus, ou bien pendant une fraction de seconde à la lumière solaire, alors l'action du spectre donne lieu à une impression depuis A jusqu'en P, mais de façon à ce que les images des parties frappées depuis le rouge jusqu'au bleu, et depuis le bleu jusqu'au delà du violet sont distinctes l'une de l'autre. D'abord l'image qui a son maximum entre G et H et va d'un côté entre G et F et de l'autre en P occupe la même place que sur la lame non insolée; mais ensuite une seconde image commence près de B, a son maximum en D, et s'étend jusqu'après F, là où la première image finit; cette seconde image est due à l'action continuatrice qui s'est exercée sur l'iodure d'argent insolé. Cet effet de continuation est aussi marqué qu'avec les papiers sensitifs décrits plus haut. On verra dans le chapitre suivant comment au moyen des courants électriques on peut déterminer l'intensité comparative des effets produits sur l'iodure d'argent dans les différentes parties du spectre solaire.

On peut, en opérant sur une surface ayant des parties insolées et d'autres non insolées, montrer très-clairement cette double action : on prépare la plaque iodurée dans une obscurité profonde, et à l'aide d'une planche en bois on couvre la moitié de la plaque, puis on expose la partie découverte à l'influence du rayonnement lumineux pendant un temps très-court. La plaque rentrée dans l'obscurité est mi-partie insolée, mi-partie non insolée, et la ligne de séparation des deux parties se trouve être une ligne droite correspondante au bord de l'écran qui a recouvert la surface. On expose alors la plaque au spectre solaire, en ayant soin que la ligne de séparation précédente soit parallèle à la longueur du spectre et la coupe en deux parties égales, et le spectre peut agir simultanément, moitié en longueur sur une surface insolée, et moitié en longueur sur une surface non insolée.

La figure 46 page suivante représente cet effet. La ligne LL indique la ligne de séparation des deux parties de la plaque : la partie supérieure a été primitivement insolée ; la partie inférieure est restée dans une obscurité complète avant l'action du spectre. Au bout de plusieurs minutes de l'influence lumineuse et après l'exposition de la plaque à la vapeur de mercure et le lavage à l'hyposulfite de soude, on reconnait que l'image du spectre sur la partie inférieure non insolée est limitée, d'une part entre G et F et de l'autre à l'extrémité de l'ultra-violet, comme on l'a dit plus haut, tandis que sur la partie supérieure, primitivement un peu insolée, il y a une seconde action, allant depuis une certaine limite com-

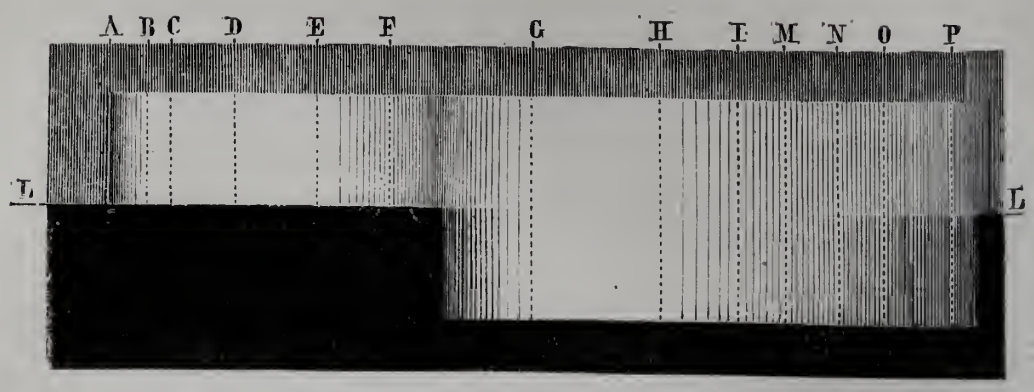



Fig. 46.

prise entre F et G jusque vers B dans le rouge. Sur les deux parties de la plaque, dans le violet et dans l'ultra-violet, les images ne peuvent être distinguées et la ligne de démarcation n'est pas sensible; mais dans le rouge le jaune et le vert elle est très-manifeste, car il n'y a impression que d'un seul côté, du côté supérieur qui est le côté insolé. Depuis B jusqu'en A et au delà, on distingue une place où la vapeur de mercure ne s'est pas déposée et où il semble que la lumière ait détruit l'effet produit par l'insolation; aussi la double raie noire A est-elle représentée en blanc, tandis que les parties voisines sont plus foncées, ce qui est l'inverse des autres raies depuis B jusqu'en H et au delà, car ces raies sont plus sombres que l'image prismatique. Quand le spectre est intense et l'action lumineuse prolongée, cet espace occupe une étendue un peu plus grande que la figure 46 ne l'indique, et sa limite va jusque vers B; mais on va revenir plus loin sur cet effet.

Si la plaque d'argent iodurée a été exposée à l'action du chlore pendant peu de temps, ce qui la rend plus sensible, comme on le verra livre III, les effets sont les mêmes ainsi que les limites d'action; ainsi on observe les mêmes effets de continuation entre le bleu et le rouge qu'avec l'iodure d'argent isolé; seulement, dans les épreuves que j'ai obtenues il semble que l'action contraire produite vers l'extrême rouge soit moins apparente.

Mais lorsque la plaque d'argent iodurée a été préalablement exposée à l'émanation du brome, préparation qui donne à la surface son maximum de sensibilité, les effets de continuation ne sont plus manifestes et les impressions formées par le spectre solaire sont les mêmes sur les plaques insolées et non insolées. La limite vers P, à l'extrême ultra-violet est la même qu'avec l'iodure et le chlorure d'argent; mais du côté le moins réfrangible l'extension est bien plus grande, car si l'exposition

au spectre est un peu longue, on observe une image presque jusqu'en B. On a donc, pour ainsi dire, une impression dans presque tout le spectre visible, le maximum d'effet se trouvant entre G et H près de G. Cette différence essentielle entre les effets présentés par la plaque iodée et bromée et les plaques iodées ou iodées et chlorées est à noter, car avec les papiers sensibles les effets de continuation sont manifestes avec les trois espèces de combinaisons d'argent, tandis qu'avec les plaques ils ne s'observent pas quand on se sert de brome. D'un autre côté, l'extension de l'image du côté du rouge est la même avec les collodions, les papiers, et les plaques iodées et chlorées, tandis que la plaque bromée donne une extension jusque vers B, le papier et le collodion de bromure d'argent ne donnant une image que jusqu'à une certaine distance de D entre F et D.

On se rend également compte, d'après cela, comment les opérateurs qui ont voulu appliquer les verres rouges et jaunes pour continuer les images de la chambre noire ont obtenu de bons résultats avec les plaques iodées et chlorées, tandis qu'ils n'ont rien eu avec les plaques bromées, puisque les effets de continuation ne peuvent être observés avec cette préparation. On explique aussi pour quel motif, quand on se servait de plaques iodées pour reproduire les images de la chambre noire, les tons verts et jaunes donnaient des impressions quand les surfaces sensibles contenaient du brome, tandis qu'ils n'en donnaient pas avec l'argent iodé et chloré.

Quand le spectre agit sur une plaque d'argent iodée puis bromée, préalablement impressionnée, après le passage de la lame à la vapeur de mercure et son lavage à l'hyposulfite de soude, depuis B jusqu'en A, et même au delà de A jusqu'à une distance à peu près égale à celle de A à C, on voit une place où la vapeur de mercure ne se fixe pas et ou la raie A se distingue en blanc sur le fond noir des parties voisines; il se produit là une action analogue à celle qui vient d'être signalée sur l'iodure, et sur laquelle on va revenir, action indiquant que les rayons rouges extrêmes ont détruit l'action préalable de la lumière diffuse. Si la lame, sans avoir été insolée à l'avance, est exposée pendant très-longtemps à l'action du spectre, la lumière diffuse qui accompagne toujours l'image prismatique impressionne assez la surface pour que l'effet précédent soit encore manifeste.

M. J. Herschell (1) remarqua, en 1839, l'action que les rayons rouges

(1) *Associat. britann.*, 1839. — *Bibliotn. univ. de Genève,* nouvelle série, t. 23, p. 185.

extrêmes exercent sur les papiers sensitifs préparés au moyen des sels d'argent, et d'après laquelle ces rayons empêchent la lumière diffuse de les faire noircir. M. Draper (1) en impressionnant une plaque d'argent iodurée avec un spectre solaire intense et non épuré observa que l'image prismatique offrait des apparences diverses, et crut que des rayons protecteurs empêchaient l'action chimique de se produire vers les extrémités du spectre. M. J. Herschell (2) attribua les différentes nuances observées dans cette circonstance à des épaisseurs inégales de couches minces déposées à la surface des lames d'argent servant de surfaces réfléchissantes; quant à l'influence des rayons extrêmes rouges, il ne leur attribua pas un effet manifestement négatif par rapport aux rayons violets, comme M. Draper l'avait fait; il pensa même que dans le cas des papiers sensitifs l'élévation de température dans les rayons rouges pouvait, en desséchant le papier, le rendre moins sensible. Mais l'action de la chaleur ne doit pas être invoquée ici, et s'il y a protection de la lame ou opposition au dépôt de la vapeur de mercure, il faut que cet effet tienne à des réactions chimiques complexes ou à une action spéciale des rayons les moins réfrangibles.

MM. Foucault et Fizeau (3) en impressionnant au spectre une plaque d'argent iodée et bromée observèrent des effets du même genre, et remarquèrent que depuis la raie C jusque de l'autre côté du rouge, et ainsi qu'on l'a dit plus haut, la vapeur mercurielle ne se condensait pas; ils pensèrent que l'effet produit par les rayons rouges devait être considéré comme contraire à celui que l'on observait sous l'influence des rayons bleus et violets.

Mais doit-on admettre des rayons négatifs, agissant en sens contraire des rayons les plus réfrangibles? L'action positive indiquant la formation d'un sous-iodure, c'est-à-dire un départ d'iode, l'action contraire serait une ioduration du sous-iodure. Si l'iode est séparé de la combinaison, comment sera-t-il restitué au sous-sel formé? Se produirait-il une oxydation comme avec le cyanure de fer blanc?

A l'époque de la publication de ce travail je fis quelques observations sur ce sujet (4), en faisant remarquer que plusieurs réactions chimiques pourraient peut-être avoir lieu, et qu'il se produirait alors

(1) *Philosoph. Mag.*, nov. 1842.
(2) *Philosoph. Mag.*, série 3, vol. 22, fév. 1843.
(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 23, page 679, 1846.
(4) Id., t. 23, p. 800.

un effet analogue à celui qui se manifeste quand du papier noirci et recouvert d'iodure de potassium blanchit par l'action de l'une des extrémités du spectre et noircit sous l'influence de l'autre, comme on l'a vu plus haut; car la surface d'argent recouverte d'iode, puis de brome, et préalablement insolée, est une couche formée par un mélange d'iodure et de bromure d'argent déjà altéré, avec de l'iodure et du bromure non altéré. Les observations faites depuis par M. Claudet (1) à l'aide de verres colorés sont venues également montrer comment avec l'iodure simple d'argent l'épaisseur de la couche complique le phénomène, puisqu'avec une couche mince d'iodure sans mélange d'autres substances (couche jaune d'or) les verres jaunes et rouges donnent lieu au phénomène de continuation que j'ai trouvé, tandis qu'avec une couche plus épaisse d'iodure et plus sensible la surface impressionnée voit son insolation détruite par la lumière qui traverse ces verres, de sorte que ceux-ci détruisent l'effet de la lumière diffuse, comme ils le font avec la couche iodée et bromée. Bien plus, une couche épaisse d'iodure non mélangé impressionnée par les rayons violets, puis exposée sous les verres rouges et jaunes, revient à l'état normal.

Si l'on rapproche ces résultats des effets électriques que j'ai observés avec des couches minces ou épaisses d'iodure d'argent, et comme on le verra plus loin, effets électriques qui sont inverses dans les deux cas, et qui montrent que la couche mince sous l'influence de la lumière indique une séparation d'iode, et la couche épaisse une réaction chimique ultérieure de l'iode sur la lame d'argent, on voit que les couches d'iodure plus ou moins mélangées de brome et d'épaisseurs diverses constituent des surfaces impressionnables dans lesquelles plusieurs réactions peuvent se produire simultanément ou successivement, et où il est difficile de discerner le résultat final.

La figure 46, représentée plus haut, indique près de A et sur une faible largeur l'effet dont il est question ici. Mais, comme on l'a déjà fait remarquer précédemment, suivant la préparation de la couche ainsi que selon l'intensité de l'insolation primitive et la durée de l'impression lumineuse, l'étendue de l'espace où se produit ce phénomène est plus ou moins grande, et peut aller depuis la raie C jusqu'au delà de A.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Id., t. 25, p. 938. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 22, p. 248.

En résumé, en considérant comme complexes les couches impressionnables formées par les composés d'argent déposés sur des papiers, des verres collodionnés et des plaques de plaqué d'argent, et en s'en tenant aux effets qui résultent des expériences faites dans les conditions indiquées ci-dessus, on reconnaît dans l'action du rayonnement sur ces substances les trois effets suivants :

1° Effet produit dans le spectre solaire depuis le bleu jusqu'au delà du violet sur tous les papiers, verres collodionnés ou lames d'argent recouvertes d'iodure de chlorure ou de bromure de ce métal, et dans le cas de la lame d'argent bromée, effet pouvant aller, du côté le moins réfrangible, jusqu'a l'orangé ; les limites d'action ont été indiquées plus haut.

2° Effet de continuation sur les papiers et les surfaces enduites d'iodure de chlorure ou de bromure avec excès d'azotate d'argent ainsi que sur les plaques iodées et iodées puis chlorées, depuis la raie B dans le rouge jusque près du bleu, lorsque ces surfaces ont été préalablement impressionnées. Sur les plaques d'argent iodées et bromées on n'observe aucun effet de ce genre ainsi que sur le chlorure et le bromure d'argent précipités isolément et lavés.

3° Effet des rayons rouges extrêmes et infra-rouges pour rendre les surfaces d'argent iodées et iodées bromées, préalablement insolées, incapables de condenser la vapeur de mercure et les placer dans des conditions semblables à celles où elles étaient avant l'insolation. Cet effet est analogue à celui que l'on observe lorsque ces mêmes rayons rouges extrêmes retardent ou s'opposent à la coloration des papiers sensitifs d'argent à la lumière diffuse.

*Composés d'or.* — Une feuille de papier enduite de chlorure d'or s'impressionne dans le spectre solaire au bout d'un temps assez long depuis E jusqu'au delà de H vers I, c'est-à-dire depuis le vert jusqu'au delà du violet. Cette impression est lente, attendu que ce sel est très-peu sensible, mais on peut en mettant à profit la propriété dont jouissent les papiers recouverts de sels d'or de continuer à se colorer à l'obscurité quand ils ont été préalablement impressionnés à la lumière, et dont il a été question page 75, obtenir une image suffisamment colorée pour distinguer les parties actives du spectre ; il suffit, après avoir reçu sur la surface du papier un spectre très-intense, d'enfermer ce papier dans une boîte pendant quelques heures pour trouver toute l'étendue correspondant à l'espace EI du spectre colorée en

jaune foncé, le maximum d'action étant entre G et H. Le n° 4 de la figure 45, page 83, représente l'image dont il est question.

*Acide chromique.* — On a vu antérieurement, page 73, qu'en présence des matières organiques, l'acide chromique cédait une partie de son oxygène et passait à l'état d'oxyde hydraté de chrome. Pour avoir aisément une surface impressionnable où cette réaction se produise, il suffit de tremper une feuille de papier dans une dissolution concentrée de bichromate de potasse, et de la laisser sécher dans l'obscurité; exposée à la lumière, elle change rapidement de couleur et passe du jaune à la couleur bois foncé. Dans le spectre, comme on le voit n° 5 (fig. 45), la coloration est à son maximum au commencement du bleu près de la raie F, et un peu plus du côté du violet que cette ligne. L'action paraît s'arrêter brusquement à l'extrémité du vert, au delà des lignes *b* et E; du côté le plus réfrangible du spectre, elle va en s'affaiblissant graduellement, et en M la coloration est presque insensible.

Si le spectre présente les raies noires principales, en prolongeant l'influence lumineuse on voit toujours les raies marquées faiblement en jaune et ayant la teinte du papier non impressionné. Un lavage à l'eau fait disparaître le bichromate non attaqué, et l'impression demeure fixée. Si l'on plonge alors le papier dans une solution alcoolique d'iode étendue, comme je l'ai montré (1), les espaces clairs deviennent bleus par suite de la réaction de l'iode sur l'amidon qui est à la surface du papier, et les raies deviennent plus visibles.

*Composés de plomb.* — On a vu précédemment, page 54, que le protoxyde jaune de plomb était impressionnable dans les rayons les plus réfrangibles, mais que cette première coloration une fois donnée à la substance, sous les verres jaunes et rouges elle devenait plus claire. Je n'ai pas répété ces expériences avec le spectre solaire, et je n'ai pu savoir si cette décoloration était le résultat d'un effet inverse du premier, c'est-à-dire s'il se produisait dans ce cas une désoxydation de la matière.

*Combinaisons de mercure.* — Les composés de mercure, ainsi que la plupart des sels métalliques d'argent, sont sensibles dans la partie violette de l'image prismatique; ayant placé dans plusieurs petits tubes le mélange d'acide oxalique et de bichlorure de mercure qui donne un précipité blanc de protochlorure de mercure à la lumière, comme on l'a

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 469.

vu antérieurement, page 69, et ayant exposé ces tubes dans les différentes parties d'un spectre solaire très-intense pendant deux heures, j'ai observé une précipitation dans le violet et l'ultra-violet et nullement dans les autres parties colorées du spectre. Ainsi cette matière m'a paru impressionnée à peu près entre les mêmes limites de réfrangibilité que le chlorure d'argent précipité.

*Combinaisons de cuivre.* — On a vu page 68 quelle était l'action exercée par la lumière diffuse sur plusieurs composés de cuivre; j'ai montré également que le protochlorure formé à la surface d'une lame de cuivre en exposant celle-ci à la vapeur de l'acide chlorhydrique, était rapidement impressionnée par la lumière. Le bromure de cuivre, en couche très-mince, obtenu par l'exposition de lames de cuivre à la vapeur de brome, ou mieux de l'eau bromée, est également fort impressionnable; quant à l'iodure de cuivre, préparé dans des conditions analogues il est moins sensible que les deux substances précédentes. Il était intéressant d'examiner comment ces divers composés se comportent sous l'influence des différents rayons du spectre solaire pour obtenir rapidement une impression lumineuse. Il faut faire usage d'un spectre très-court et très-intense; la longueur de celui que j'ai employé était de 5 à 6 centimètres sur 1 centimètre de largeur.

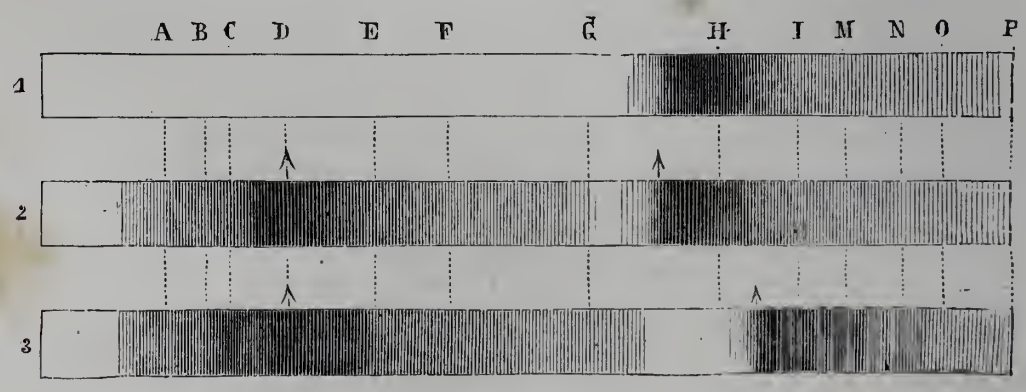



Fig. 47.

N° 1 iodure de cuivre.

N° 2 bromure de cuivre.

N° 3 chlorure de cuivre.

La figure 47 représente l'effet obtenu sur les trois corps dont il vient d'être question. L'iodure de cuivre, n° 1, manifeste une action depuis un intervalle compris entre G et H jusque vers P; je n'ai pas distin-

gué d'effet dans les rayons les moins réfrangibles pendant la durée de l'expérience.

Le bromure de cuivre, fig. 47, n° 2, a offert deux espaces impressionnés, séparés par une partie voisine de G où la plaque de cuivre est restée presque intacte : le premier, compris dans la partie la plus lumineuse du spectre, a son maximum en D, et occupe l'étendue G A en se prolongeant bien au delà de A ; le deuxième correspond à la région active du spectre sur l'iodure de cuivre, a son maximum entre G et H, décroît brusquement vers G, et s'étend jusque près de P, dans l'ultra-violet. On doit remarquer que la réaction chimique exercée par la lumière sur le bromure de cuivre est une de celles qui présentent la plus grande extension dans les rayons infra-rouges.

Le chlorure de cuivre, fig. 47, n° 3, comme le bromure, donne deux espaces impressionnés séparés par une région inactive. Le premier s'étend du rouge au violet; le maximum d'action a lieu près de D, et la teinte de l'image va en se dégradant vers les deux extrémités, en se prolongeant dans la partie infra-rouge; ainsi ses limites d'action suivent à peu près celles des rayons qui excitent la rétine, et le maximum d'effet a lieu près des points où se trouve le maximum de lumière. Le deuxième prend brusquement vers I, et va en se dégradant jusqu'en O; il est moins long que le premier, mais entre I et M l'action est presque aussi vive que vers D. La région du spectre située entre H et I est donc presque inactive sur le protochlorure de cuivre; les deux images, séparées par une partie où se trouve un minimum d'action prismatique, rappellent les images phosphorescentes décrites dans le premier volume et obtenues par l'action du spectre solaire sur les sulfures de calcium et de strontium.

La comparaison des images 2 et 3 de la figure 47 montre que dans la partie la moins réfrangible du spectre le bromure ainsi que le chlorure de cuivre sont sensibles entre les mêmes limites de réfrangibilité, tandis que dans les rayons les plus réfrangibles le chlorure a son maximum situé plus loin que le bromure.

En exposant au spectre une lame de cuivre recouverte de chlorure de ce métal, dont une moitié avait été préalablement impressionnée comme dans l'expérience faite avec l'iodure d'argent et citée page 89, j'ai reconnu que le deuxième espace impressionné, c'est-à-dire le plus réfrangible, était de même nuance sur les deux moitiés de la surface, tandis qu'il m'a semblé que la région rouge, jaune et verte avait donné une coloration un peu plus intense sur la portion impressionnée que sur celle

qui ne l'était pas; mais la différence n'a pas été assez grande pour que l'on puisse tirer aucune conclusion de cette observation.

*Matières organiques.* — Si les surfaces sensibles préparées avec les sels métalliques présentent des effets très-variés quand elles sont soumises à l'action des différents rayons du spectre solaire, les matières organiques offrent des différences plus grandes encore; il suffira de citer plusieurs exemples pour le prouver.

On a vu antérieurement, page 56, quelles étaient les observations de Wollaston sur la résine de gaïac, qui se colorait en bleu verdâtre par l'action des rayons violets et se décolorait ensuite dans la partie la moins réfrangible du spectre. La figure 45, reproduite ici, nos 6 et 7,

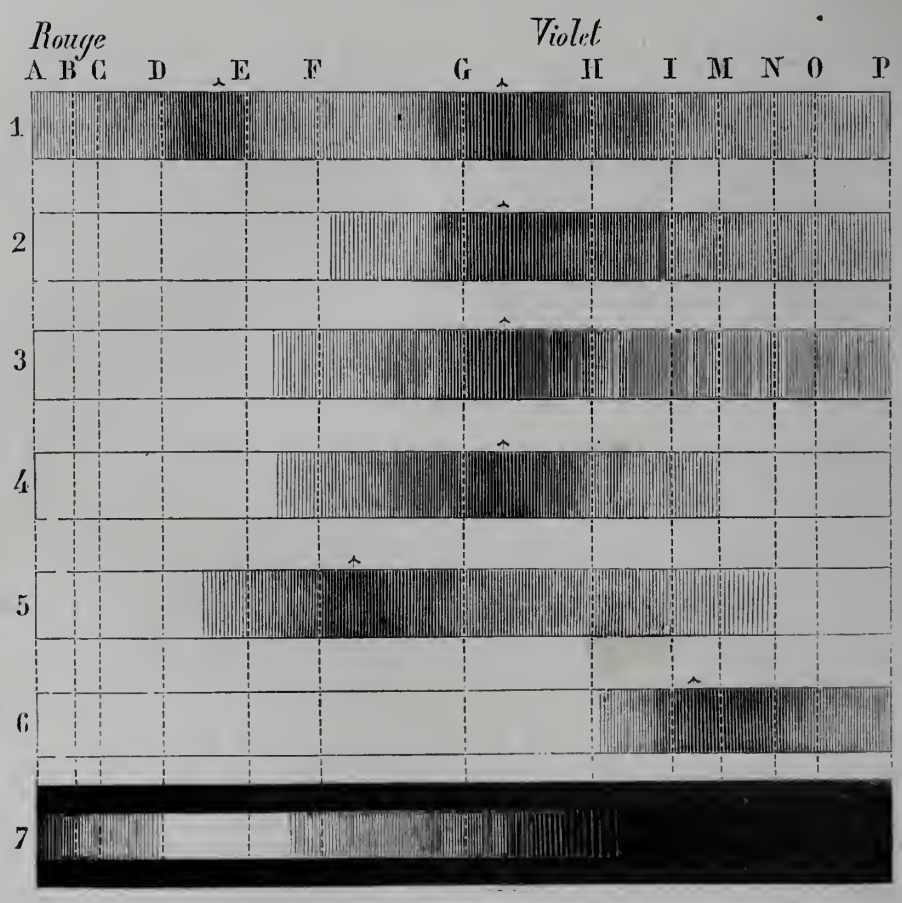



Fig. 45.

indique les deux effets que j'ai obtenus dans les conditions suivantes. Ayant préparé une solution alcoolique de gaïac après avoir traité préalablement cette résine dans de l'eau chaude, à plusieurs reprises, j'en ai recouvert une feuille de papier qui a été exposée à l'action d'un petit spectre concentré pendant trois heures; la coloration bleue s'est manifestée au delà des rayons violets, entre H et P, fig. n° 6; le maximum s'est trouvé près de M.

Une partie de la même feuille de papier a été alors colorée en bleu en la traitant par une solution aqueuse de chlore, qui produit l'oxydation de la résine, et cette surface a été exposée à l'action du même spectre. J'ai trouvé au bout de plusieurs heures un espace décoloré s'étendant du rouge au violet et représenté n° 7, le maximum d'action paraissant être près de F. On a déjà parlé dans le chapitre précédent, page 56, de cette double action de la lumière sur le gaïac, mais il n'est pas encore démontré que cet effet soit le résultat d'une désoxydation de la matière bleue.

M. J. Herschell (1), dans un travail déjà cité antérieurement, a étudié l'action du spectre sur des feuilles de papier recouvertes de cette résine. Il a reconnu qu'en faisant usage d'une dissolution alcoolique de gaïac, si l'action prismatique a lieu dans une chambre noire où aucune lumière diffuse ne pénètre, il se produit une belle couleur bleue dans les rayons violets et au delà, comme on l'a dit plus haut. Mais si on laisse en même temps arriver de la lumière diffuse sur la feuille de papier, alors le fond général du papier tourne au vert brun, excepté dans la partie où tombent les rayons les moins réfrangibles; de A en F, dans cette région, la teinte blanche est conservée, et il semble que la lumière protége le papier contre l'action de la lumière diffuse. Il peut se faire que les deux actions indiquées plus haut, coloration et destruction de la coloration, aient lieu en même temps et conduisent à l'effet observé.

Quant à l'impression depuis le bleu jusqu'au delà du violet, elle consiste en une première partie bleue commençant au bleu du spectre, c'est-à-dire vers la raie F, ayant son maximum à l'extrême violet et diminuant d'intensité au delà, de façon à atteindre un minimum; puis on observe un second maximum, beaucoup plus foncé que le premier, et qui correspond sans doute à l'effet observé quand la lumière diffuse ne pénètre pas dans la chambre. Ainsi la décoloration de la matière, ou l'effet en apparence inverse de celui qui produit la coloration, a lieu seulement depuis le rouge jusqu'au vert. Mais il faut remarquer que la lumière diffuse venant à agir depuis le vert jusqu'au violet, il est possible que dans ces régions l'effet de cette lumière l'emporte sur l'action décolorante des rayons dispersés par le prisme, et que l'on n'observe une déco-

(1) *Philosoph. transact.*, 2e p. (1842). — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 44, p. 164.

loration que là où l'action de la lumière diffuse est plus faible. Il est donc probable que, suivant l'intensité de la lumière diffuse par rapport à celle du spectre, la ligne de séparation entre la partie blanche de l'impression prismatique et la partie bleue, au lieu d'être en F, est plus près du rouge ou plus près du violet; ce dernier cas correspondrait à l'intensité la plus faible de la lumière diffuse.

Si le papier imprégné de résine de gaïac a été bleui par le chlore, on observe l'effet indiqué plus haut, c'est-à-dire une décoloration depuis le rouge jusqu'au violet. Il se produit un effet analogue quand on prépare une solution de gaïac dans de l'eau rendue alcaline par la soude, et que l'on colore également avec le chlore la surface du papier qui en est recouverte.

En étudiant l'action du spectre solaire sur du papier enduit de différentes teintures de sucs de fleurs dissous dans l'alcool, M. J. Herschell a reconnu que les diverses couleurs végétales qui sont influencées par les rayons solaires sont détruites dans des portions différentes du spectre solaire. En général, les rayons actifs ne sont compris qu'entre le rouge et le violet; l'action est positive, c'est-à-dire que la lumière détruit la couleur, soit en totalité, soit en laissant une teinte affaiblie sur laquelle les rayons solaires n'exercent plus d'action, et opère, pour ainsi dire, une analyse chromatique dans laquelle deux couleurs sont séparées, l'une étant enlevée, détruite, l'autre laissée pour résidu. Cette destruction de couleur, comme on l'a vu précédemment, page 57, est ordinairement due à une oxydation de la matière par les rayons lumineux.

Dans quelques circonstances l'action de la lumière ne se montre pas immédiatement, mais alors des réactifs chimiques peuvent faire apparaître une image, ces réactifs agissant différemment sur les substances avant l'action de la lumière ou après qu'elles ont été impressionnées. M. J. Herschell a même observé qu'avec un papier recouvert d'une matière colorante jaune, le *corchorus japonica*, les impressions peuvent augmenter d'intensité dans l'obscurité comme les impressions sur les sels d'or. Sous l'action du spectre cette couleur jaune est détruite en quinze ou vingt minutes par les rayons verts, bleus et violets. Si l'action se prolonge, le papier blanchit, quoique plus faiblement, dans le rouge et au delà du violet, et l'image présente trois maxima d'intensité et deux minima; ces deux derniers correspondent au jaune et au violet extrême. Mais vingt-cinq jours après, temps pendant lequel l'image

avait été conservée à une lumière faible, deux taches blanches distinctes apparaissaient aux deux extrémités du spectre, et les trois maxima étaient plus marqués. Cette extension des effets au-delà du rouge prismatique, comme avec les iodures d'argent et de cuivre, est à signaler.

M. J. Herschell a remarqué que les rayons les plus efficaces pour la destruction d'une couleur végétale quelconque sont, dans un grand nombre de cas, ceux qui par leur couleur sont complémentaires de la couleur de la matière végétale détruite. C'est ainsi que les matières végétales d'une couleur jaune ou orangée sont détruites avec plus d'énergie par la partie bleue du spectre; les couleurs bleues par les rayons rouges, orangés et jaunes, et les matières pourpres et roses par les rayons jaunes et verts; il n'y a qu'un petit nombre d'exceptions.

Il est possible que le phénomène d'absorption de lumière puisse rendre compte de ces résultats : en effet, quand une substance est colorée en jaune, par exemple, elle absorbe les rayons autres que ceux-ci, c'est-à-dire les rayons bleus et violets, et ces rayons étant absorbés avec plus de facilité, on doit concevoir que ce sont ceux qui doivent altérer la matière, et non pas ceux qui n'éprouvent pas les mêmes effets. Si ce principe s'étendait aux autres corps impressionnables, on voit que les composés blancs devraient être impressionnés surtout par les rayons ultra-violets; c'est peut-être pour ce motif que le chlorure d'argent ainsi que le mélange de bi-chlorure de mercure et d'acide oxalique, matières incolores, sont sensibles surtout à l'influence des rayons compris dans cette partie du spectre.

On a vu dans le chapitre précédent, page 59, que les huiles grasses exposées à l'air absorbent de l'oxygène ; elles s'épaississent alors et se durcissent de plus en plus selon leur nature, et, indépendamment des différentes circonstances qui influent sur le phénomène, la lumière ainsi que la chaleur sont les causes qui exercent l'action la plus grande. M. Cloëz (1), en étudiant l'influence des rayons qui ont traversé différents écrans en verre coloré sur un certain nombre d'huiles, a constaté que cette influence était plus grande avec les rayons les plus réfrangibles, violets et bleus, qu'avec les rayons jaunes et rouges.

On voit, d'après les nombreux exemples qui ont été cités dans ce paragraphe, que pour chaque matière chimiquement impressionnable à la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 61, p. 321 et 981 (1865).

lumière l'action des rayons solaires est différente, c'est-à-dire que ces substances ne sont pas impressionnées entre les mêmes limites de rayonnement et que les positions des maxima et des minima d'action ne sont pas les mêmes. Ainsi, chaque substance est un appareil particulier, qui est sensible d'une manière particulière et à l'aide duquel on doit interroger le mode d'action de l'agent lumineux.

On a pu voir que l'étendue active du spectre sur les composés très-impressionnables est en général plus grande que celle du spectre lumineux, à moins que l'on ne considère comme agissant sur la rétine les rayons ultra-violets (*voir* tome 1er, livre IV, page 141). On avait avancé que l'extrémité violette du spectre produisait des décompositions et l'extrémité rouge des combinaisons; mais on a des exemples d'effets contraires produits dans chaque partie du spectre : ainsi la combinaison du chlore et de l'hydrogène, l'oxydation du gaïac ont lieu à l'extrémité violette comme la décomposition des sels d'argent; d'un autre côté, la décomposition des sels de chrome, des sels de cuivre a lieu dans le jaune et le vert comme la décoloration des matières organiques. On peut conclure seulement de l'ensemble des faits observés que les rayons violets et ultra-violets sont en général plus efficaces pour agir sur les composés métalliques, et les rayons les moins réfrangibles pour produire l'oxydation des couleurs végétales.

On a supposé que l'on avait opéré avec des prismes en flint très-blanc; avec d'autres prismes bien purs, en quartz ou en spath fluor, on aurait les mêmes résultats. Cette question, au reste, sera étudiée dans le paragraphe suivant.

### § 2. *Action des écrans incolores et colorés. Prismes divers.*

*Écrans incolores.* — L'action des substances liquides ou solides sur les rayons actifs de diverse réfrangibilité permet d'expliquer différents effets, et entre autres l'inégale transmission, par les écrans incolores, des rayons lumineux et de la partie active du rayonnement sur diverses substances impressionnables. On va voir, d'après les résultats qui vont être cités ci-après, que cet effet tient à l'action exercée par ces écrans sur une partie du rayonnement, la partie ultra-violette, qui n'influence pas sensiblement la rétine.

M. Malaguti (1) a cherché à comparer les effets produits par les écrans transparents sur les rayons qui impressionnent les sels d'argent,

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 72, p. 5 1839.

en mesurant le temps que des bandes de papier impressionnable mettent à se colorer de la même nuance quand elles sont placées sous ces écrans. Mais j'ai montré (1) que ce procédé était sujet à plusieurs causes d'erreur : d'un côté, la réflexion inégale des rayons sur les faces terminales des écrans, principalement quand ces écrans renferment des liquides, peut diminuer l'intensité lumineuse du faisceau de rayons incidents ; d'un autre côté, certaines parties du rayonnement peuvent agir en sens inverse sur la matière sensible, comme avec le gaïac, ou bien les rayons, suivant leur réfrangibilité, peuvent exercer une action dont l'énergie dépend de l'impressionnabilité de la matière, et alors l'action ne se produit pas proportionnellement au temps (comme avec le chlorure d'argent, *voir* page 84). L'accélération ou le retard de la coloration d'une même surface ne donne donc que l'effet total, et ne peut servir à indiquer l'action des écrans sur les diverses parties actives du rayonnement lumineux.

Il n'en est pas de même si l'on examine l'action des substances transparentes sur les rayons du spectre solaire, en comparant à chaque instant les effets produits dans chaque région du spectre avec ceux que donne la même partie de l'image prismatique, mais cette dernière étant obtenue sans l'intervention de l'écran transparent. J'ai fait pour cette étude usage de la disposition suivante : un écran métallique percé de deux petites ouvertures circulaires de 5 millim. de diamètre, très-voisines, et dont les centres sont sur une même verticale, est fixé en avant d'un prisme en flint blanc ; devant une des ouvertures est placé l'écran solide ou l'écran creux rempli de liquide sur lequel on opère, tandis que l'autre ouverture reçoit une petite lame de verre ou reste libre.

Si l'on place ce système dans une chambre obscure dans laquelle on introduit un faisceau de rayons solaires à l'aide d'une ouverture verticale d'un petit diamètre, à une distance de 1 ou 2 mètres de cette ouverture, mais de manière que les rayons tombent normalement sur l'écran, on aura derrière le prisme deux faisceaux de rayons qui ne différeront que parce que l'un n'aura traversé que l'air, et que l'autre aura traversé en plus le liquide employé.

On peut alors recevoir les deux spectres à quelque distance sur une surface impressionnable, et on aura deux spectres horizontaux, dont les parties de même réfrangibilité seront situées sur une même verticale. On

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 9, p. 280 (1842).

peut donc, en faisant agir ces deux spectres simultanément sur un même papier sensible ou sur une même matière chimiquement impressionnable, reconnaître si dans celui qui est formé par les rayons qui ont traversé le liquide ou le solide se trouvent ou ne se trouvent pas tous les rayons contenus dans l'autre.

Afin de bien préciser la position des spectres, on place en outre dernière le prisme une lentille achromatique de 1 mètre de foyer environ, et l'on met le prisme dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens. Alors les rayons se croisent, et au-delà du foyer de la lentille on a les deux spectres avec toutes leurs raies comme il a été dit précédemment, de sorte qu'il est facile de préciser la position des diverses parties actives de ces deux spectres.

On a d'abord fait usage d'un prisme de flint; nous verrons plus loin qu'avec différents prismes ces effets sont à peu près les mêmes. On s'est servi comme substance impressionnable d'iodure d'argent préparé sur papier avec excès d'azotate d'argent, ou de lames de plaqué d'argent recouvertes d'iodure.

D'après ce procédé d'expérimentation, le spectre formé par les rayons qui ont traversé l'écran aurait un peu moins d'intensité d'action que l'autre, en supposant même que l'écran n'ait aucun pouvoir absorbant sur les rayons solaires, car une partie des rayons du faisceau incident se réfléchit sur les parois de l'écran. Pour mettre les deux spectres dans le même état relatif d'intensité, on place sur la route du second faisceau un écran en flint qui par la réflexion sur ses deux faces fait perdre à ce faisceau une partie de son intensité, et donne à peu près la même énergie d'action aux deux spectres.

Lorsqu'on emploie comme écran un des liquides suivants placés dans une petite cuve formée par des lames de verre très-mince, savoir :

| | |
|---|---|
| L'eau, | L'alcool, |
| Le chlorure d'étain liquide, | L'acide sulfurique, |
| L'essence d'anis, | L'acide valérianique, |
| L'essence de copahu, | L'acétate d'oxyde d'amyle, |

on ne voit aucune différence bien distincte dans les deux spectres.

Si l'action dure de dix à quinze minutes, on observe une impression entre les lignes noires F et P. Lorsque cette action a plus de durée, deux heures par exemple, il se produit alors une impression entre F et A, les rayons les moins réfrangibles agissant par continuation.

Avec les liquides incolores dont les noms suivent :

Eupione,
Aldehyde,
Iodure d'amyle,

on distingue une légère différence dans les deux spectres. Celui formé par les rayons qui ont traversé seulement l'air et le flint donne sur la surface sensible une impression qui s'étend de F en P, tandis que l'action exercée par l'autre ne s'étend que jusqu'en O; de sorte que ces liquides absorbent en petite quantité les rayons extrêmes les plus réfrangibles. Quant aux rayons les moins réfrangibles, ils ne sont pas absorbés, et après un long espace de temps on peut avoir avec chaque spectre une impression de F en A.

En introduisant dans l'écran les substances suivantes :

Essence de térébenthine, Huile de naphte,

on reconnaît que les rayons extrêmes du côté de P sont également absorbés et que l'action absorbante s'étend vers N. Quant aux rayons les moins réfrangibles, on trouve toujours que leur action est la même dans les deux spectres et qu'elle s'exerce de F en A.

En employant un écran contenant les liquides désignés ci-après :

Essence de citron, Acide azotique,
Hydrocarbure de brome, Acide chlorhydrique,

on voit toujours dans le spectre des rayons qui ont traversé l'air et le verre une impression qui s'étend jusqu'en P, tandis que dans l'autre spectre l'action chimique s'arrête vers M ou entre M et N. Le pouvoir absorbant de ces liquides s'exerce donc sur les rayons extrêmes depuis M jusqu'en P.

Avec le chlorure de carbone liquide, l'essence d'élémi, le sulfure de carbone, les rayons qui sont au-delà de M sont arrêtés et ne donnent plus d'effets sur les surfaces sensibles.

En faisant usage des liquides suivants :

Créosote, Essence d'amandes amères,

l'impression dans le spectre s'arrête brusquement après H, de sorte que ces deux liquides absorbent tous les rayons plus réfrangibles que

la raie I. La partie du rayonnement comprise entre H et A traverse ces liquides comme elle traverse l'air, sans altération.

Quand on fait usage de la dissolution de sulfate acide de quinine, qui jouit de propriétés phosphorescentes, comme on l'a vu dans la première partie de cet ouvrage, on reconnaît que l'action chimique dans le spectre des rayons qui ont traversé ce liquide s'arrête brusquement en H, de sorte que le pouvoir absorbant de cette substance s'exerce sur tous les rayons qui influencent l'iodure d'argent de H en P. Pour les rayons situés de H en A, dans toute la partie visible du spectre, ils n'éprouvent aucune action de la part de cette solution. Du reste, toutes les matières très-fortement phosphorescentes, comme l'azotate d'urane, le verre d'urane, le bisulfate de quinine, absorbent la partie ultra-violette de l'image prismatique et donnent lieu au même effet.

Ainsi avec les différents liquides incolores cités plus haut, on arrive à ce résultat remarquable que la partie du rayonnement comprise de A en H dans la partie visible du spectre n'est pas absorbée, tandis que celle qui est en dehors du violet visible de H en P est plus ou moins absorbée suivant les substances, les rayons les plus réfrangibles étant les éléments les plus absorbables.

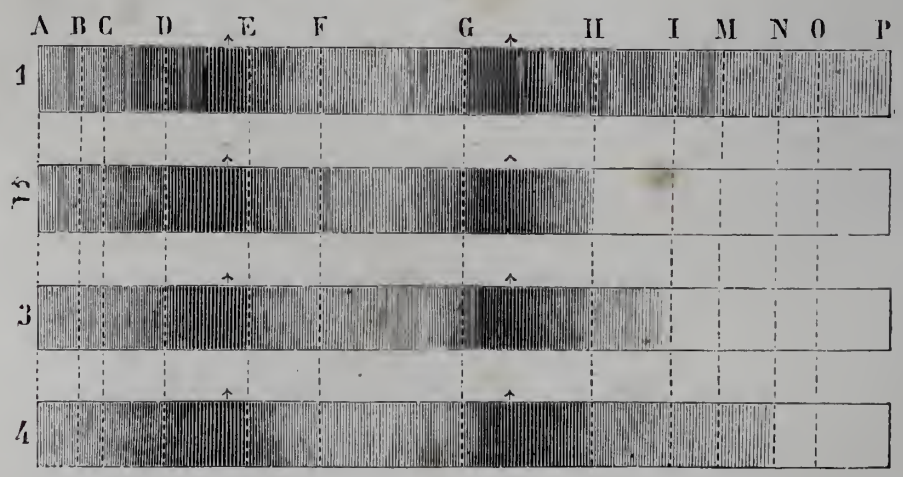



Fig. 48.

La figure 48, nos 1, 2, 3, 4, réunit les étendues des spectres qui représentent l'action produite lors de l'interposition de plusieurs écrans incolores. On voit que la partie ultra-violette est seule plus ou moins absorbée. Le n° 1 représente l'étendue du spectre agissant sur l'iodure d'argent impressionné, quand aucun écran liquide n'exerce son action sur les rayons qui traversent le prisme; le n° 2 représente l'effet produit par la créosote, l'essence d'amandes amères et le sulfate acide de

quinine; le n° 3 celui qui résulte de l'emploi du sulfure et du chlorure de carbone; le n° 4 l'étendue de l'impression quand on fait usage de l'essence de citron, de l'acide azotique ou de l'acide chlorhydrique.

Avec les écrans solides on observe les mêmes phénomènes : les uns arrêtent certains rayons situés au delà de H, entre H et P, d'autres laissent passer ces rayons en totalité. Ainsi l'interposition d'une lame de spath fluor ou de mica très-mince ne donne lieu à aucune action bien manifeste. Avec des lames de nitre ou baryte sulfatée, taillées en écran de 1 ou 2 millimètres d'épaisseur et à faces parallèles, on voit que les rayons extrêmes situés vers O sont en partie absorbés. Avec des écrans de verre à vitre, de plomb carbonaté, de diopside, on reconnaît que les rayons situés au delà de M sont absorbés de telle sorte que ce spectre n'a qu'une étendue limitée d'un côté en A et de l'autre entre M et N, comme dans le n° 4 de la figure 48. Enfin, en faisant usage d'un écran en dichroïte bien transparente, de 1 millimètre d'épaisseur, on voit que tous les rayons situés depuis I jusqu'en P sont absorbés complétement, de telle sorte que le spectre chimique n'a qu'une étendue AI, la limite extrême la plus réfrangible étant située vers I, entre H et I à peu près, comme le représente le n° 3 de la figure ci-dessus.

Dans toutes les expériences faites avec ces écrans solides, on n'observe, comme avec les liquides cités plus haut, aucune action inégale de la part de ces substances sur les rayons les moins réfrangibles situés de A en H entre les limites extrêmes des rayons visibles; es écrans peuvent bien agir par absorption sur ces rayons, mais ils agissent avec la même intensité sur toute l'étendue du spectre visible AH, de sorte que les rayons lumineux passant toujours en même proportion, les écrans ne cessent pas d'être incolores.

Une remarque que l'on doit mentionner ici, c'est que bien que l'étendue des espaces dans lesquels l'iodure d'argent est impressionné soit différente, puisque toute la partie IP peut manquer, cependant le maximum d'action reste sensiblement à la même place, entre H et G.

On a supposé que l'on avait agi avec l'iodure d'argent comme corps sensible, mais il est facile d'étendre ces résultats aux autres substances chimiquement impressionnables. Si l'on considère d'abord le chlorure ou le bromure d'argent sur lesquels le spectre solaire agit sur une étendue presque aussi grande que sur l'iodure, excepté vers l'extrémité P, en substituant à l'iodure un de ces composés, on trouve les mêmes résultats avec les écrans transparents; seulement, le temps

nécessaire pour colorer ces substances est plus long que pour l'iodure.

Si l'on fait usage du papier enduit de bichromate de potasse, sur lequel l'action du spectre s'étend de E en I, comme on l'a vu page 83, fig. 45, le maximum étant vers F, l'action chimique a lieu presque en entier dans la partie visible du spectre AH, à l'exception des rayons extrêmes, vers I. En faisant tomber, comme précédemment, les deux spectres sur cette surface, et en ayant soin que l'un des deux spectres soit formé par un faisceau de rayons qui a traversé la créosote ou le sulfate acide de quinine, on ne voit pas une grande différence entre les deux impressions produites, si ce n'est vers l'extrémité I, parce que pour cette substance impressionnable la partie du spectre solaire IMP inactive est celle qui se trouve principalement arrêtée par ces deux écrans.

Le gaïac, au contraire, qui bleuit dans la partie HP du spectre, doit rester incolore sous un écran de créosote ou de sulfate acide de quinine; et même, lorsqu'il a été coloré en bleu sous l'influence de la lumière, placé sous cet écran il est décoloré, car il n'est alors sensible qu'à l'action des rayons compris depuis A jusqu'en H, lesquels opèrent cette décoloration.

L'expérience peut être aisément faite de la manière suivante : On recouvre une feuille de papier de résine de gaïac en la trempant dans une solution alcoolique de cette résine, puis on la sépare en deux; on en met une moitié dans une capsule de porcelaine pleine d'eau et l'autre dans une capsule semblable contenant une solution de sulfate acide de quinine. Si on les expose toutes les deux à la lumière diffuse, la feuille de papier qui est dans l'eau pure ne tarde pas à verdir, puis à bleuir, tandis que l'autre reste incolore. Une fois que la première feuille est bleue on la met dans la seconde capsule, et on laisse cette dernière exposée à la lumière ; alors cette feuille de papier ne tarde pas à redevenir blanche jaunâtre, comme précédemment.

La grande réfrangibilité des parties actives du spectre qui colorent en bleu cette substance est cause des différences considérables auxquelles on est conduit quand elle est influencée par la lumière au travers des écrans transparents; tandis qu'avec la substance précédente, l'acide chromique, les écrans transparents agissent peu différemment, puisque la partie active est principalement située entre H et A.

En résumé, on voit que toutes les substances sensibles n'étant pas impressionnées entre les mêmes limites de réfrangibilité, l'action des

écrans doit être très-différente sur les rayons qui les influencent. Ainsi, toutes celles qui ne sont pas impressionnées par des rayons d'une réfrangibilité plus grande que H s'impressionnent à peu près également sous tous les écrans transparents, quels qu'ils soient; je dis à peu près, car on ne connaît pas pour chacune d'elles la perte due à la réflexion de la lumière; tandis que les substances qui sont sensibles à l'action de rayons d'une réfrangibilité plus grande que H s'impressionnent inégalement sous les écrans transparents, puisque ces derniers rayons peuvent être absorbés par les écrans transparents et incolores.

Pour dire *a priori* quelle sera l'action d'un écran transparent sur une substance chimique donnée, il faut simplement chercher entre quelles limites de réfrangibilité cette substance est impressionnable, et ensuite quelle est la portion de la partie ultra-violette qui est absorbée par cet écran.

On peut se rendre compte par une comparaison bien simple de quelle manière un seul rayonnement peut donner lieu à des impressions d'étendue différentes dans le spectre : quand on reçoit le spectre lumineux sur une feuille de papier blanc, on voit toutes les couleurs prismatiques; mais si cette feuille de papier est colorée successivement de différentes teintes, en bleu, en vert, en jaune, en rouge, on ne distingue généralement de lumineuse sur cette feuille de papier que la partie bleue quand elle est teinte en bleu, la partie rouge si elle est teinte en rouge, etc....., de sorte que le spectre lumineux n'a pas la même étendue dans ces différents cas.

Lorsqu'on reçoit maintenant le spectre solaire sur les différentes matières chimiquement impressionnables, on peut concevoir qu'elles ont une espèce de coloration par rapport aux rayons solaires, et que les seuls rayons qui nous sont rendus sensibles sont ceux qu'elles absorbent dans les régions où elles se colorent. Seulement, dans ce cas-ci les rayons dont nous examinons l'action sont des rayons absorbés, tandis que dans le cas précédent les seuls rayons rendus visibles étaient ceux qui étaient réfléchis irrégulièrement par les molécules de matière colorée répandue sur l'écran blanc. Mais pour la lumière nous avons la couleur pour juger de la différence des rayons qui impressionnent la rétine, tandis que nous n'avons pas de qualité analogue pour distinguer les différents rayons réfrangibles qui influencent une substance chimique sensible, si ce n'est le nouvel état moléculaire de cette substance.

On doit remarquer qu'il se produit ici à l'extrémité la plus réfrangible du spectre le même effet que celui qui a lieu à l'extrémité la moins réfrangible quand des écrans incolores agissent sur les rayons calorifiques, et l'on a vu dans le livre Ier, page 28 et suivantes, comment ces écrans absorbaient inégalement la partie infra-rouge prismatique.

*Prismes différents.* — Dans les expériences précédentes on aurait pu craindre que les rayons lumineux, après avoir traversé les écrans transparents, aient pu être absorbés par la matière du prisme de flint, du moins dans les parties les plus réfrangibles. Pour examiner jusqu'à quel point cet effet pouvait avoir lieu, j'ai fait usage de prismes de différentes substances, et successivement de prismes de sel gemme, de cristal de roche et d'alun.

On doit également avoir soin de se servir d'une glace métallique pour réfléchir le faisceau de rayons lumineux qui pénètre dans la chambre noire, car sans cela, avec une glace de verre étamé, les rayons avant de se réfléchir sur la seconde surface traversent l'épaisseur de la glace, de sorte qu'en entrant dans la chambre obscure ils sont dans le même état que s'ils avaient traversé un écran de flint d'une épaisseur double de celle de la glace. On a disposé l'appareil comme précédemment, si ce n'est qu'il n'y avait pas de lentille derrière le prisme de sel gemme ou de quartz dont on se servait. En plaçant, par exemple, un prisme de sel gemme derrière l'écran muni de deux ouvertures, on a deux spectres comme ci-dessus; mais devant une des ouvertures on a fixé une plaque de flint glass d'un centimètre d'épaisseur, de sorte qu'un des spectres était formé par des rayons qui n'avaient traversé que du sel gemme, l'autre par des rayons qui avaient traversé le sel gemme et l'écran de flint glass.

En recevant ces deux spectres sur une plaque iodurée ou sur une feuille de papier enduite d'iodure d'argent, si l'on ne laisse durer l'action que quelques secondes, on a seulement une impression vers la partie la plus réfrangible du spectre, et on reconnaît que l'étendue des deux spectres est sensiblement la même; s'il y a une légère différence, c'est en faveur du spectre formé par les rayons qui n'ont traversé que le sel gemme, c'est-à-dire que le spectre ainsi produit s'étend un peu au delà de P. Ainsi, le flint glass blanc très-limpide agit à très-peu de chose près comme le sel gemme sur les rayons ultra-violets qui colorent l'iodure d'argent; cependant, il manifeste une légère action absorbante sur les rayons extrêmes P.

Lorsqu'on emploie un écran de verre à vitre au lieu de flint, le spectre formé par les rayons qui traversent cet écran est moins étendu que l'autre dans le sens de la plus grande réfrangibilité, et il se termine entre M et N, de sorte que toute la partie NP est absorbée.

En employant un prisme d'alun au lieu d'un prisme de sel gemme, on trouve la même étendue aux deux spectres, dont l'un est formé par les rayons qui ne traversent que l'alun, tandis que l'autre est dû aux rayons qui ont traversé l'écran de flint. Avec un prisme de quartz blanc, l'étendue de la partie ultra-violette est plus grande. On a vu dans le premier volume, page 140, que, d'après les recherches de MM. Helmholtz, Muller, etc., le spath d'Islande avait même encore une plus grande transparence que le quartz pour les rayons ultra-violets.

On voit donc qu'en employant différents prismes solides, les résultats sont les mêmes qu'avec le flint bien pur, en ce qui concerne l'étendue des parties actives comprises entre A et H bien entendu, car pour la partie extrême de l'ultra-violet elle est plus étendue avec le quartz et le spath d'Islande qu'avec les verres les plus blancs.

On peut remarquer aussi qu'avec ces prismes différents les maxima d'action sont situés aux mêmes places si l'on n'a égard qu'à leur position relative par rapport aux raies du spectre solaire ; car l'on sait très-bien que quoique les raies soient les mêmes avec différents prismes, cependant leur position relative change un peu, le pouvoir dispersif des diverses substances n'étant pas le même et les couleurs n'occupant pas toujours le même étendue relative.

Quand, au lieu de prismes solides, on fait usage de prismes liquides terminés par des lames minces de flint, on observe que la position des maxima d'action correspond aux mêmes raies que précédemment; le liquide agit en outre comme écran en absorbant certaines parties du rayonnement lumineux; alors l'étendue du spectre du côté du rouge A reste semblable ; mais du côté de l'ultra-violet P elle peut varier beaucoup. Si l'on prend, par exemple, un prisme de sulfure de carbone, dont le pouvoir dispersif est si considérable, on a un spectre lumineux excessivement étalé; mais comme cette substance, arrête les rayons situés depuis I jusqu'en P, l'action chimique ne se manifeste que de A en F pour les rayons les moins réfrangibles, et de F en I pour les autres. Ainsi les raies N, O, P ne peuvent plus être dessinées chimiquement avec ce prisme. Avec d'autres prismes liquides les résultats seraient analogues, c'est-à-dire que la substance

agirait non-seulement comme prisme, mais encore comme écran.

*Écrans colorés.* — Si les écrans transparents et incolores n'exercent une action absorbante énergique que sur la partie ultra-violette du spectre (ce qui est une conséquence de l'unité du rayonnement, car ils ne sont incolores que parce qu'ils absorbent de la même manière les rayons compris entre les réfrangibilités extrêmes A et H), et si les effets chimiques dans chaque partie du spectre sont en rapport avec les effets lumineux, les écrans colorés peuvent agir par absorption sur quelques-unes des parties visibles du spectre, et on doit trouver que les images photographiques des mêmes parties font défaut; c'est ce que les résultats suivants vont démontrer :

On a fait usage du même procédé expérimental que celui qui a été employé plus haut page 103, et au lieu de placer un écran incolore en face d'une des ouvertures de l'écran métallique qui se trouve devant le prisme, on a mis les écrans colorés dont on voulait examiner l'action.

En employant un verre rouge assez foncé coloré par le protoxyde de cuivre, verre qui est monochromatique puisqu'il ne laisse passer que le rouge et le commencement de l'orangé prismatique, on ne voit sur l'écran qui reçoit les spectres que la partie lumineuse comprise entre A et le milieu de l'orangé, et qui donne une teinte rouge bien prononcée; les lignes noires dans cette bande lumineuse se distinguent assez bien. Cette image se termine après A, et ensuite brusquement de l'autre côté, entre C et D; on reconnaît, en outre, une légère lueur vers F, indiquant que des rayons de cette réfrangibilité traversent cet écran. Pour suivre aisément cette description on peut se reporter à la planche fig. 13, page 80.

En recevant le spectre sur de l'iodure d'argent primitivement impressionné, voir page 89, au bout de deux heures d'action d'un soleil énergique on distingue une impression sur la plaque après l'avoir passée au mercure, impression qui correspond exactement à la partie éclairée en rouge et qui se termine aux mêmes lignes; les raies *a* sont assez bien définies. De plus, on reconnaît une légère action vers F, indiquant que des rayons de cette réfrangibilité ont impressionné la plaque.

On voit ainsi que là où la lumière est absorbée totalement il n'y a pas d'action chimique, et que par rapport à l'iodure d'argent ce verre rouge ne laisse passer presque en totalité que les rayons qui continuent l'action chimique commencée.

D'autres verres rouges moins foncés donnent les mêmes résultats,

si ce n'est que l'on a un plus grand nombre de rayons situés vers F et impressionnant la plaque. On reconnaît ainsi qu'il est possible que des verres rouges très-foncés laissent passer des rayons d'autre réfrangibilité que le rouge, et que l'iodure soit impressionné par des rayons correspondant au bleu ou au vert prismatique; on pourrait donc être induit en erreur en se servant d'un écran rouge, si l'on supposait que cet écran ne laisse passer que des rayons dont la réfrangibilité correspond à cette nuance. Il en serait de même avec d'autres verres colorés pour des parties différentes du spectre, et les expériences faites par leur concours ne peuvent indiquer immédiatement la réfrangibilité des rayons actifs d'après la couleur de ces écrans à lumière diffuse.

Quand on place sur la route d'un des faisceaux de rayons lumineux avant sa réfraction un verre jaune clair, on voit que la partie la moins réfrangible du spectre, c'est-à-dire celle qui est située entre A et F, passe en totalité, tandis que les rayons bleus, indigo et violets sont en partie absorbés; cela fait qu'au delà de G on ne distingue plus aucune trace de lumière. Lorsqu'on reçoit le spectre sur l'iodure d'argent déjà impressionné, on reconnaît qu'entre A et F la plaque reçoit une impression due à l'action des rayons les moins réfrangibles; mais on aperçoit aussi une action dans les rayons les plus réfrangibles, jusqu'en I d'un côté, et de l'autre jusqu'entre G et F.

Une solution de persulfocyanure de fer est obtenue en versant du sulfocyanure de potassium dans une solution d'un sel de peroxyde de fer. Lorsqu'elle est assez concentrée, elle a une couleur rouge qui est à peu près la même que celle du verre rouge coloré par le protoxyde de cuivre. Placée dans un écran de verre à faces parallèles, elle peut être mise sur la route du faisceau lumineux avant sa réfraction. Si on l'étend d'eau, elle jaunit, et en solution étendue, elle a une couleur jaune.

Avec la solution étendue on observe les mêmes effets qu'avec le verre jaune, lorsqu'on la met sur le trajet du faisceau de rayons lumineux; c'est-à-dire que la portion AF du spectre passe sans altération, tandis que la région HF est à peu près absorbée. Quant aux parties impressionnées de l'iodure, elles suivent les parties lumineuses : la partie FA passe sans absorption; on distingue une impression légère dans la partie FI, correspondant aux rayons les plus réfrangibles, et IP est totalement absorbé.

Avec la solution concentrée on a les mêmes résultats qu'avec le verre rouge, c'est-à-dire que la partie AC du spectre lumineux et peut-

être un espace s'étendant au delà de C, entre C et D, sont seuls apparents. En exposant dans le spectre de l'iodure déjà un peu impressionné, après deux heures d'action on a une impression entre les mêmes limites. Si cette substance sensible n'est pas impressionnée primitivement, les phénomènes sont à peu près les mêmes, si ce n'est qu'il faut plus de temps; car la lumière diffuse qui accompagne toujours le faisceau lumineux introduit dans la chambre obscure impressionne assez la plaque pour que la partie AC agisse énergiquement.

Une solution concentrée de tournesol paraît rouge par transmission, et agit comme un verre rouge; très-étendue, elle est bleue, et dans des proportions intermédiaires, elle semble violette. En opérant avec une solution violette placée dans l'écran de verre, on reconnaît que cette substance laisse passer la partie rouge AC du spectre lumineux; il y a une interruption de C entre D et E, au commencement du vert, puis on distingue la partie lumineuse depuis cette limite jusqu'en H, qui ne paraît que peu affaiblie.

L'impression sur la plaque d'argent iodurée donne les résultats suivants : si l'exposition ne dure que plusieurs minutes, on a une impression depuis F jusqu'au delà de H, correspondant aux rayons les plus réfrangibles; si l'action dure plus longtemps, une heure ou deux, l'impression a lieu depuis F jusque entre D et E, là où les rayons lumineux diminuent d'intensité, et ensuite on a une image de C en A correspondant à la partie lumineuse AC.

Les verres bleus colorés par le cobalt donnent, comme on le sait, une image du spectre traversée par des bandes d'absorption (*voir* page 7) : si la teinte du verre est assez foncée, on distingue la partie AC rouge, puis un intervalle obscur AE, et ensuite la partie bleue, indigo et violette, qui paraît passer presque sans absorption. Si le verre est moins foncé et même assez clair, on voit d'abord la partie AC lumineuse rouge assez intense indiquant que ces rayons passent presque sans absorption; puis un espace qui s'étend de D au milieu de DE, et qui est jaune, mais moins lumineux que le jaune prismatique; l'intervalle entre ces deux portions prismatiques éclairées est plus obscur, mais au milieu, entre C et D, on a une faible teinte orangée. En E on a une partie lumineuse EH, qui commence à la fin du vert et qui finit à la limite extrême ordinaire du violet. Ainsi il y a quatre parties lumineuses, séparées par trois bandes obscures.

Quand on fait agir sur l'iodure d'argent le spectre formé par le fais-

ceau des rayons qui ont traversé cet écran, on observe d'abord une action de N en F; si l'iodure a été impressionné, au bout d'une heure et demie d'action, en outre de l'effet produit dans les rayons les plus réfrangibles, on distingue une impression de F en E, et une autre de C en A correspondant à la partie lumineuse. L'intervalle CE sur la plaque reste net, car l'intensité des rayons jaunes ne paraît pas dépasser celle de AC; et pour que cela soit il faut que vers D les rayons éprouvent une absorption assez forte. Mais au bout de trois heures et demie d'action sur la plaque on a une impression correspondant à la partie jaune vers D. Ainsi les trois parties les plus lumineuses des rayons qui ont traversé l'écran bleu ont exactement leurs correspondantes dans les impressions sur la plaque d'argent iodurée. Il est probable qu'une action d'une journée aurait donné un indice de la faible bande orangée; mais l'expérience serait difficile à faire, en ce qu'on ne distingue qu'avec peine cette partie du spectre de la lumière diffuse qui l'environne, et qui agit aussi à la longue sur la plaque.

On voit donc qu'avec les différents écrans colorés les parties du spectre lumineux qui sont absorbées correspondent exactement aux régions où les impressions chimiques n'ont pas lieu; mais il faut avoir égard à l'étendue des parties actives du spectre sur les matières impressionnables, et à la position relative du maximum de lumière et des maxima d'action chimique sur ces substances.

Dans l'examen de ces divers effets, il faut aussi remarquer que les impressions lumineuses sur la rétine ne se font pas dans les mêmes conditions que les réactions chimiques que l'on observe : en effet, si un faisceau lumineux de très-faible intensité frappe la rétine, il ne donne aucune impression sensible; centuplez ce rayon, et vous aurez une action marquée. Mais faites que ces cent rayons égaux au premier ne viennent que successivement frapper la rétine, au lieu d'arriver ensemble, alors ces actions ne s'ajouteront pas, et il n'y aura aucune action produite; de sorte que l'on pourra recevoir pendant des heures entières l'action d'un rayon lumineux excessivement faible sans rien apercevoir.

Quant aux actions chimiques, il n'en est pas de même : un faisceau de rayons d'une intensité très-petite ne produira aucune action; mais que cent faisceaux de rayons égaux au premier viennent frapper la matière sensible ensemble ou successivement, elle recevra la même impression,

car il se produira la même somme d'action chimique; de sorte qu'au bout de plusieurs heures un faisceau de rayons excessivement faible pourra être rendu appréciable par son action chimique sur une surface donnée. Ces différences d'effets proviennent de ce que la rétine ne conserve que pendant un temps très-court l'impression de la lumière, tandis que la substance chimique sensible conserve et accumule l'impression qu'elle reçoit des rayons lumineux.

### § 3. *Sources lumineuses diverses : lumière électrique, flammes.*

On a vu quels sont les éléments de la lumière solaire qui exercent une action chimique sur un grand nombre de substances. Si l'on vient à faire agir d'autres sources lumineuses sur les matières impressionnables, les effets produits dépendront de la composition de la lumière de ces sources ainsi que de leur intensité. On observe donc des effets analogues à ceux dont on est témoin dans les phénomènes de phosphorescence, et dont il a été question dans le tome I^er^, page 325.

A composition lumineuse égale, l'intensité des rayons influe seule; à intensité égale, plus les sources renferment d'éléments actifs, plus elles agissent vivement. Mais comme les différentes matières impressionnables sont affectées entre des imites différentes de réfrangibilité, une lumière active pour une substance peut être inactive pour une autre, et *vice versa*. Cependant, puisqu'en général, sauf pour le cas des matières organiques, les sels métalliques impressionnables sont influencés par la partie violette et ultra-violette de l'image prismatique, quand ces sources renferment en abondance des éléments très-réfrangibles, elles agissent avec efficacité principalement sur les composés d'argent.

Les flammes provenant des matières carbonacées, comme les huiles grasses, l'acide stéarique et le gaz d'éclairage, ont beaucoup de rayons rouges et jaunes et peu de rayons bleus; de là leur peu d'efficacité sur les changements de couleur des sels d'argent, et à plus forte raison quand étant mélangées d'air elles ont perdu leur pouvoir éclairant. Si la température de combustion est plus élevée, comme avec le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, dans lequel un fragment de chaux ou de magnésie est porté à l'incandescence, la lumière est plus vive quoique présentant toujours les éléments jaunes et rouges. Mais quand la température est plus élevée encore, et peut-être aussi en raison des éléments que la flamme contient, comme lors de la combustion du

magnésium dans l'air, alors les rayons bleus et violets sont en plus grande proportion, et l'activité chimique de la flamme est assez grande.

Fig. 11.

On a vu dans le premier volume combien il était facile dans la lampe au magnésium que l'on représente ici de nouveau, fig. 11, de régler la combustion de fils ou de lames de ce métal à l'extrémité du conduit métallique Pq ; quand on songe à l'activité de la lumière émise, on voit qu'on peut très-utilement se servir de cet appareil pour les besoins de la photographie.

Ainsi, quand les sources lumineuses doivent leur lumière à l'irradiation d'un corps solide opaque et incandescent, la proportion des rayons très-réfrangibles et, par suite, l'activité chimique sur les corps impressionnables dans la partie la plus réfractée du spectre dépendent de la température de combustion. Il résulte de là que l'arc voltaïque formé entre des pointes de charbon dont la température est encore plus haute (*voir* tome Ier, page 128) dépasse encore en activité la source précédente ; aussi peut-on répéter avec un faisceau émané d'un appareil photo-électrique un certain nombre des expériences faites avec un faisceau de rayons solaires. La figure 27 *bis*, représentée de nouveau page 118, indique la disposition employée quand on se sert d'un régulateur de lumière électrique pour produire, par réfraction dans un prisme *P*, un spectre lumineux que l'on fait agir sur des substances impressionnables.

La coloration d'une flamme, même par une très-faible quantité de matières étrangères, peut exercer la plus grande influence sur l'action chimique qu'elle exerce. D'après MM. Bunsen et Roscoe, la flamme non éclairante du gaz d'éclairage mélangé d'air, ou la flamme inactive de l'alcool, colorée en rouge par le chlorure de lithium ou de strontium, ou colorée en jaune par le chlorure de sodium ou de potassium, ou

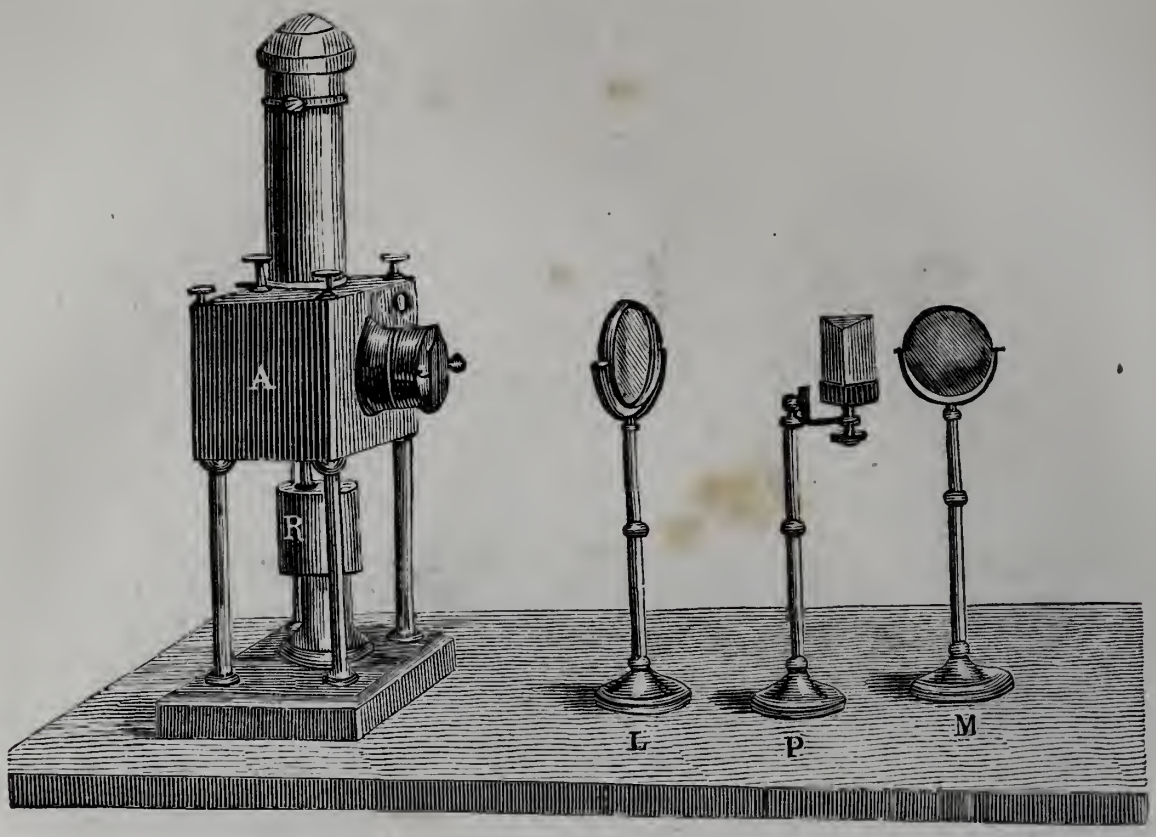



Fig. 27 *bis*.

bien encore rendue verte par le chlorure de baryum, ne donne aucune action chimique sur le mélange de chlore et d'hydrogène; mais la flamme verte bleuâtre assez vive obtenue avec le chlorure de cuivre volatilisé ainsi que la flamme terne du chlorure d'antimoine contiennent des éléments très-réfrangibles, et ont une action plus grande que celle du gaz d'éclairage ordinaire.

La combustion du sulfure de carbone donne également des rayons violets et ultra-violets; on peut se procurer aisément une flamme de ce genre en remplaçant, dans une lampe à alcool, le liquide par du sulfure de carbone. Il faut seulement, à l'aide d'une petite cheminée, rejeter en dehors de la pièce où l'on opère les produits de la combustion, qui sont dangereux pour la respiration. Avec une flamme de ce genre on colore en quelques minutes une feuille de papier recouverte de chlorure d'argent et placée à quelques centimètres de distance.

On peut encore citer comme source lumineuse active l'arc voltaïque formé entre des électrodes en mercure, et par exemple la lampe imaginée par M. Way, et dont la lumière est due à l'incandescence de la vapeur mercurielle (1).

(1) Voir I^er volume, page 186. — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, t. 8, p. 186-1861.

J'ai montré dernièrement (1) comment on pouvait colorer les étincelles électriques de façon à donner des lumières de différentes nuances, et cela au moyen d'une disposition assez simple; je pense donc utile de l'indiquer ici. Il suffit, pour obtenir ce résultat, d'exciter des décharges d'un appareil d'induction entre l'extrémité d'un fil de platine et la surface supérieure d'une dissolution contenant un sel aisément vaporisable. Voici la disposition expérimentale employée :

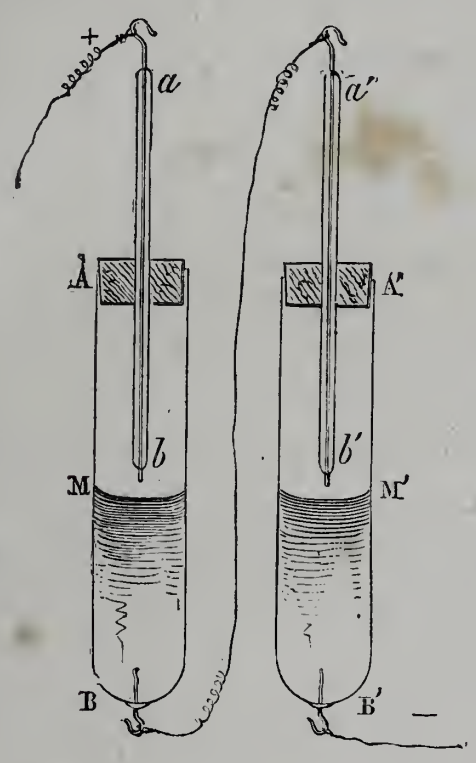


Fig. 49.

Soit AB, fig. 49, un tube fermé par en bas et traversé par un fil de platine B, qui fait communiquer le liquide remplissant environ la moitié du tube avec une des extrémités du fil extérieur d'une forte bobine d'induction; le fil de platine *ab*, qui pénètre par en haut dans le tube, passe dans l'intérieur d'un tube capillaire, et ne dépasse ce dernier que d'une longueur d'un millimètre environ; son extrémité *b* est placée à quelques millimètres seulement de la surface M du liquide. L'extrémité *a* du fil de platine supérieur touche à l'autre extrémité du fil induit, de sorte que l'interrupteur de l'appareil d'induction venant à fonctionner, des décharges se succèdent à des intervalles plus ou moins rapprochés entre la pointe *b* du fil de platine et la surface M du liquide. Pour que les étincelles ne partent pas entre l'extrémité *b* du fil et le

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 65, p. 1097 (1867), et t. 66, p. 121, janvier 1868. J'ai su, depuis la publication de ces recherches, que M. Séguin avait déjà observé que lorsque les décharges d'un appareil d'induction éclatent entre un fil de platine et la surface d'une dissolution saline, la base du sel dissous imprime à l'auréole une coloration assez intense dépendant de sa nature (*Annales de chimie et de physique*, 3me série, t. 69, p. 108-1863).

M. Séguin pensait que l'effet n'était bien marqué que si la dissolution formait le pole positif, et qu'elle dépendait de l'action mécanique produite dans le sens de la décharge; mais c'est précisement le contraire qui a lieu, comme on va le voir, et cette différence tient à ce que M. Seguin n'avait pas déterminé exactement le sens de la décharge; d'après mes observations, l'effet de coloration n'est donc pas dû à un simple transport mécanique du sel dissous.

tube de verre, on donne à celui-ci un diamètre assez grand, 25 à 30 millimètres au moins; sa hauteur AB est de 12 à 15 centimètres.

Lorsque le liquide est de l'eau pure, les décharges ont une couleur très-pâle; mais si l'eau renferme en dissolution quelques faibles quantités d'un sel aisément vaporisable, comme le chlorure de sodium, de calcium, etc., alors les décharges sont vives et colorées de nuances différentes. Si l'appareil d'induction est de faible puissance, on peut n'observer aucun effet de coloration quand l'extrémité *b* du fil *ab* est négatif; il faut qu'il soit positif. Mais si la bobine est puissante comme celle décrite tome Ier, page 204, alors on observe une action, quel que soit le sens de la décharge, et l'auréole dont s'entoure celle-ci présente dans les deux cas des effets de coloration; toutefois, le maximum est donné quand le fil *ab* est positif. Ce résultat est contraire à ce que l'on aurait pu supposer, car on sait que le transport de la matière dans l'arc voltaïque comme dans les liquides traversés par l'électricité a lieu dans le sens de la direction du pôle positif au pôle négatif; il est probable, dans ce cas, qu'il se produit à la surface du liquide une décomposition polaire donnant lieu à une réduction du métal, cause de la coloration de la décharge. Avec un appareil d'induction d'une certaine énergie, l'intensité lumineuse de la décharge ainsi que les nuances qu'elle présente prennent un grand éclat.

La composition lumineuse étudiée par réfraction est plus complexe que celle qui résulte de l'introduction dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz de quelques traces de sels renfermés dans la dissolution, et le nombre des raies ou bandes lumineuses que l'on voit est plus grand que dans ce dernier cas. D'abord l'eau est elle-même vaporisée, et l'on a en même temps que les raies, qui dépendent des composés dissous, la composition lumineuse, qui appartient à ses éléments constituants; d'un autre côté, comme on le sait d'après les expériences faites avec les étincelles électriques qui éclatent entre des conducteurs solides, la température est plus élevée que celle de la flamme d'un bec de gaz. Quant aux lignes qui proviendraient de la volatilisation du platine, elles doivent être faibles, car avec l'eau je ne les ai pas distinguées; avec les autres métaux il pourrait n'en être pas de même.

Quand on se sert de dissolutions concentrées, les effets lumineux sont très-marqués, et avec les chlorures notamment ils sont très-brillants. Les décharges prennent un grand éclat avec le chlorure de strontium (teinte rouge), avec le chlorure de calcium (teinte orangée),

le chlorure de sodium (teinte jaune), le chlorure de magnésium (teinte verte), le chlorure de cuivre (teinte verte-bleuâtre), et le chlorure de zinc (teinte bleue). Mais d'autres sels en dissolution dans l'eau, comme divers composés de baryum, de potassium, d'antimoine, de fer, de manganèse, d'argent, d'uranium, etc., donnent également des effets plus ou moins marqués.

On peut s'arranger pour faire succéder les décharges à des intervalles très-courts, de façon à ce que le phénomène paraisse presque continu; on a alors comme une flamme colorée, et le tube au milieu duquel cet effet est produit fonctionne à la manière d'une petite lampe dont la source lumineuse a une composition et une couleur déterminées. Quand on agit ainsi, le passage de l'électricité élevant la température du liquide, il faut prendre le tube un peu grand ou opérer dans une capsule.

La figure 49, page 119; représente deux tubes placés à la suite l'un de l'autre, de façon que chaque décharge les traverse simultanément; on pourrait en disposer ainsi plusieurs, et avoir à la fois des flammes de diverses couleurs.

On s'est borné dans ce chapitre à indiquer les différentes sources lumineuses dont on peut se servir; dans le chapitre IV il sera question de la comparaison des intensités de différentes flammes, en se servant de plusieurs des réactions chimiques qu'elles peuvent manifester.

# CHAPITRE III.

## Effets électriques produits sous l'influence de l'action chimique de la lumière.

### § 1. *Effets observés avec les lames métalliques et les substances impressionnables.*

Chaque fois que des réactions chimiques ont lieu, les corps entre lesquels elles s'exercent manifestent des effets électriques qui peuvent être

rendus sensibles à l'aide des galvanomètres, si ces corps sont suffisamment conducteurs de l'électricité; or, la lumière produisant de nombreuses réactions, comme on l'a vu précédemment, on doit pouvoir obtenir des effets électriques en disposant convenablement les appareils. Les premières tentatives que j'ai faites dans cette voie datent de 1839 (1) : J'avais remarqué qu'en faisant agir un faisceau de rayons solaires sur deux liquides agissant chimiquement l'un sur l'autre et superposés avec soin dans un vase en verre, il se développait un courant électrique accusé par un galvanomètre très-sensible dont les deux extrémités étaient en relation avec deux lames de platine plongeant dans chacune des dissolutions; Je me suis aperçu plus tard (2) que dans ces expériences on observait un phénomène complexe, et que les résultats présentaient également l'effet produit sur les lames métalliques elles-mêmes. J'ai donc été conduit à faire plusieurs séries d'expériences touchant l'action des rayons solaires sur les lames métalliques.

Pour observer les effets du rayonnement solaire, on prend une boîte en bois ou bien un vase en verre, fig. 50, noirci intérieurement et divisé,

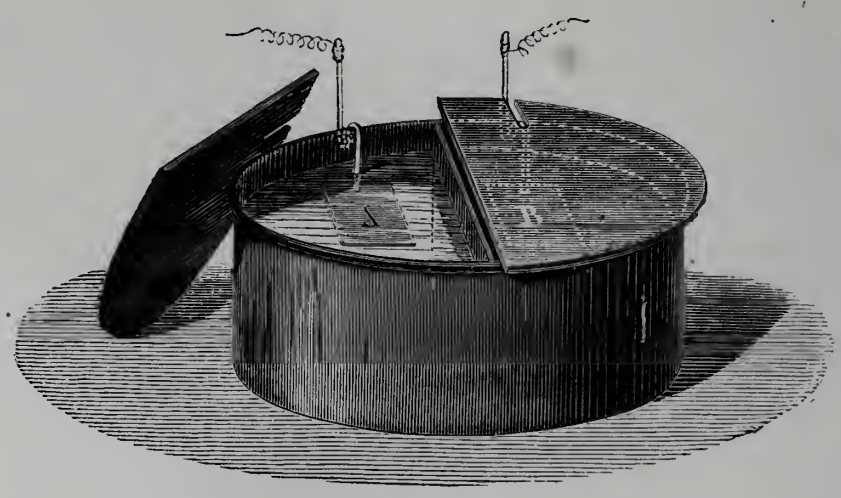


Fig. 50.

au moyen d'une membrane très-mince, en deux compartiments que l'on remplit de la solution d'essai. Dans chacun de ces compartiments, on plonge des lames de platine ou d'or A et B, après les avoir préalablement chauffées au rouge. Ces lames, placées horizontalement dans

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 9, p. 145, juillet 1839.

(2) *Id.*, t. 9, p. 561. — Thèse à la faculté des sciences de Paris, publiée le 4 août 1840. — *Biblioth. univ. de Genève,* nouvelle série, t. 35, p. 136 (1841). — *Ann. de chimie, et de physique,* 3e série, t. 56, p. 99.

l'appareil, sont mises en relation avec un multiplicateur qui doit être à très-long fil pour être plus sensible; on peut le prendre de 25 à 30 mille tours. Enfin, on recouvre chaque compartiment avec une planchette, afin d'intercepter l'action de la lumière solaire; quand on veut opérer, on enlève successivement chacune d'elles.

En opérant avec une solution alcaline, on trouve que la lame exposée aux rayons solaires directs prend au liquide l'électricité négative; avec une solution acide, elle prend au contraire l'électricité positive. Les déviations de l'aiguille aimantée du galvanomètre peuvent être de plusieurs degrés.

On est porté naturellement à admettre d'abord que ces effets sont dus uniquement au rayonnement calorifique qui échauffe une des lames, tandis que l'autre reste à la température ordinaire; mais il n'en est pas ainsi, comme on le verra ci-après.

On a déterminé l'influence de plusieurs écrans de verre coloré sur la production du phénomène, en évaluant la déviation maximum de l'aiguille aimantée du galvanomètre par première impulsion, quand ces écrans ont été interposés sur la route des rayons lumineux avant de frapper chaque lame; les déviations ne doivent être considérées que comme donnant le plus ou le moins d'effet produit sur les lames.

Voici le résultat d'une des expériences qui ont été faites : on a placé dans le même tableau les résultats des effets calorifiques observés à l'aide d'une pile thermo-électrique exposée aux rayons solaires en interposant les mêmes écrans sur la route des rayons solaires; les nombres qui sont dans les troisième et cinquième colonnes du tableau expriment les rapports des effets produits par les rayons solaires sur les lames métalliques et sur la pile thermo-électrique, en représentant par 100 l'action exercée sans l'interposition d'aucun écran :

| ÉCRAN. | EFFET PRODUIT SUR LA LAME DE PLATINE. | | EFFET PRODUIT SUR UNE PILE THERMO-ÉLECTRIQUE. | |
|---|---|---|---|---|
| | Intens. du courant électrique par 1re impulsion. | Rapport des effets produits. | Intens. du courant électrique par 1re impulsion. | Rapport des effets produits. |
| Sans écran..... | 4°,5 | 100 | 13,2 | 100 |
| Verre violet..... | 1,5 | 33 | 8,5 | 64 |
| — bleu..... | 1 | 22 | 4,0 | 30 |
| — jaune..... | » | » | 11,0 | 83 |
| — rouge..... | 0 | 0 | 7,0 | 53 |
| — vert..... | » | » | 0 | 0 |

On reconnaît que l'ordre des écrans n'est pas le même, et que les verres rouges et jaunes, qui sont très-perméables aux rayons les moins réfrangibles agissant sur la pile thermo-électrique, arrêtent à peu près toute action sur la lame de platine.

Les effets observés avec les différentes parties du spectre solaire conduisent à la même conclusion : on a appliqué verticalement une des lames de platine, chauffée préalablement au rouge, sur une des faces d'une boîte en verre qui avait été noircie, à l'exception de la partie qui se trouvait vis-à-vis de la lame ; les extrémités du galvanomètre communiquaient, l'une avec cette lame, et l'autre avec une seconde lame plongeant aussi dans de l'eau acidulée qui remplissait la boîte et qui était complétement cachée à la lumière. Ayant alors projeté successivement sur cette lame les rayons colorés d'un spectre solaire formé en réfractant les rayons directs du soleil, on a obtenu les résultats suivants :

Aucune action dans les rayons.... { rouges. orangés. jannes. verts.

Faible action dans les rayons.... { bleus. indigo.

Action marquée dans les rayons violets.

Il faut remarquer que toutes les fois que les lames sont très-propres, qu'elles ont séjourné dans l'acide azotique concentré, et qu'elles ont été portées à la température rouge, les différentes parties du spectre sont à

peu près sans effet pour déterminer la production des courants électriques dont nous recherchons la cause.

Ces résultats tendent à montrer que les rayons qui agissent sur des lames de platine ou d'or plongées dans des dissolutions sont plus réfrangibles que les rayons calorifiques.

D'autres métaux que l'or et le platine, et en particulier des métaux altérables, comme le laiton et l'argent, donnent lieu à des effets analogues; bien plus, la polarisation préalable des lames, surtout si celles-ci ayant été plongées dans de l'eau ont été mises en contact avec le pôle positif d'une pile, peut augmenter beaucoup l'effet électrique observé.

M. Grove (1) a fait depuis des expériences analogues aux précédentes et a observé, comme je l'avais déjà trouvé, que la lumière peut exercer une influence sur des lames de platine polarisées, plongées dans de l'eau acidulée et en relation avec les deux extrémités d'un multiplicateur. Dans ce cas, la polarisation primitive des lames de platine est augmentée, et l'effet produit ne semble pas dû à une action calorifique qu'exercerait l'action solaire.

On peut se demander maintenant quel est le mode d'action de la lumière dans les circonstances actuelles ; c'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Cependant, comme les effets sont presque nuls, mais non pas anéantis tout à fait, quand les lames d'or ou d'argent sont parfaitement décapées et ont été chauffées à plusieurs reprises, il pourrait se faire que les effets produits quand elles ne sont pas dans cet état fussent dus à l'action de la lumière sur des corpuscules de matières organiques adhérant aux lames; car toute matière organique tend à se combiner avec l'oxygène sous l'action de la lumière, ainsi qu'on l'a vu antérieurement page 57, et dans cette réaction l'eau qui renferme de l'oxygène jouerait le même rôle que l'oxygène atmosphérique. Si cet effet n'a pas lieu et s'il ne se produit pas une altération des lames, il faut que la lumière détermine un trouble dans l'état d'équilibre des particules ; mais la première supposition est la plus probable.

Quand des lames métalliques inoxydables se trouvent recouvertes de composés altérables à la lumière, alors ces matières se décomposant, si un des éléments peut se dissoudre dans le liquide conducteur, on observe, au moment de la séparation de ces éléments, un courant électrique

(1) Voir *Philosophical Magasine*, décembre 1858. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 56, p. 99.

qui peut être assez énergique. Examinons ce qui se passe avec les composés d'argent, qui sont si éminemment impressionnables, et principalement le chlorure et le bromure d'argent, préparés par précipitation à l'obscurité.

Lorsque le chlorure d'argent est exposé à la lumière, il perd de son chlore et se change en sous-chlorure; d'un autre côté, ce composé n'étant pas conducteur de l'électricité quand il est en masse, et le devenant quand il est en couche très-mince, il s'ensuit que l'on peut observer des effets électriques produits sur ce corps lorsqu'il subit des réactions chimiques sous l'influence de la lumière. A cet effet, on l'étend, quand il est nouvellement préparé par précipitation, sur une lame de platine plongée dans l'eau ; dès l'instant qu'elle est exposée aux rayons solaires, le chlorure noircit, et l'aiguille du galvanomètre est déviée dans un sens qui annonce que la lame est positive. Ce résultat est facile à expliquer : le chlorure d'argent en se décomposant prend l'électricité positive, qu'il transmet à la lame de platine avec laquelle il est en contact, tandis que le liquide prend l'électricité négative. Dans ce cas, on ne peut opérer avec une lame d'argent, attendu que la réaction du chlore, qui provient de la décomposition du chlorure, produit en réagissant sur l'argent un courant électrique inverse de celui que l'on étudie. Ces effets ne peuvent être attribués à l'action du rayonnement solaire sur le platine, vu que la lame de platine lorsqu'elle est parfaitement décapée et qu'elle est exposée seule à l'action des rayons solaires, non-seulement est négative, mais encore ne produit qu'un courant électrique donnant une déviation qui ne peut surpasser 1 ou 2°.

Des lames d'or avec le chlorure d'argent se comportent comme des lames de platine. Si l'on veut avoir un courant produit par la décomposition seule du chlorure d'argent, il faut opérer avec de l'eau pure : on prend une lame de platine qui a séjourné quelque temps dans l'eau, et on la recouvre d'une petite feuille de papier non collé; puis on place sur cette lame du chlorure d'argent nouvellement préparé. Le courant produit par la décomposition du chlorure est alors de quelques degrés seulement sous l'influence de la lumière, et plus faible que sans l'interposition du papier.

Le meilleur procédé pour appliquer le chlorure d'argent sur la lame consiste à déposer ce corps au dessus, en couche assez mince, et à faire chauffer doucement la lame dans l'obscurité. L'adhérence du chlorure

sur la lame de platine est assez grande pour qu'il ne s'en détache point, quelle que soit la position que l'on donne à cette lame.

Ce composé nouvellement préparé ayant été placé sur une lame de platine, puis exposé aux rayons solaires, j'ai obtenu un courant initial par première impulsion, de 7°,5 avec un galvanomètre moyennement sensible. Cette expérience, répétée à plusieurs reprises, a donné le même résultat, malgré la coloration du chlorure. Celui-ci étant resté longtemps exposé au soleil, j'ai eu les résultats suivants :

| | Déviation par première impulsion. |
|---|---|
| Le chlorure d'argent, étant blanc, exposé à la lumière a donné un courant de... | 7°,5 |
| Après $\frac{1}{4}$ d'heure d'exposition au soleil, le chlorure étant devenu violet foncé.... | 5°,5 |
| Après $\frac{1}{2}$ heure, le chlorure étant presque noir grisâtre..... | 4°,5 |
| Après $\frac{3}{4}$ d'heure, *id.* noir grisâtre..... | 4° |
| Après une heure, *id.* | 3° |
| Deux heure ensuite, *id.* | 2° |

Le courant électrique étant constant pendant assez longtemps, on peut donc se servir de son action pour étudier l'influence des verres colorés sur la décomposition du chlorure d'argent ; en suivant la marche indiquée précédemment, j'ai trouvé les résultats suivants :

| Écrans. | Intensité du courant électrique. | Rapport des effets produits. |
|---|---|---|
| Sans écran | 15° | 100 |
| Verre blanc | 10 | 66 |
| — violet | 8 | 53 |
| — bleu | 6 | 40 |
| — vert, — jaune, — rouge | 0 | 0 |
| Sans écran | 15 | 100 |

On a placé également la lame recouverte de chlorure d'argent dans les divers rayons colorés du spectre solaire, et l'on a vu qu'il n'y avait action produite que dans les rayons bleus, violets et ultra-violets.

Le bromure d'argent, qui se décompose rapidement à la lumière, donne un courant qui est plus intense que celui donné par le chlorure. Ainsi, en recouvrant les deux lames de platine de l'appareil à compartiment, fig. 50, page 122, avant de les plonger dans l'eau acidulée, l'une de bromure et l'autre de chlorure d'argent, à la lumière diffuse, on a eu successivement avec le chlorure 15° de déviation, et 26° avec le bro-

mure; ce dernier dans les premiers instants a même donné un courant capable de faire dévier l'aiguille du galvanomètre de 55°, quand on a fait tomber sur lui les rayons solaires. Dans une autre expérience, l'aiguille du galvanomètre a été chassée à 75° lors de la décomposition du bromure. Dans chaque expérience l'intensité du courant est variable, et dépend de l'épaisseur de la couche impressionnable étendue sur la lame de platine ou d'or.

On a vu précédemment qu'en opérant avec le chlorure d'argent la déviation par première impulsion était constante pendant un certain temps, lorsque les rayons solaires frappent ce composé; mais il n'en est pas de même avec le bromure : l'action dans les premiers instants a été plus intense, comme on l'a vu; mais au bout de peu de temps tout courant a cessé. Si on emploie l'iodure d'argent, qui ne change pas sensiblement de couleur à la lumière lorsqu'on le prépare par précipitation et qu'il est bien lavé, on reconnaît qu'en l'étendant sur une lame de platine plongeant dans l'appareil à compartiment, et qu'on l'expose à la lumière, il rend cette lame assez fortement positive. Le courant électrique produit a même été presque aussi intense que celui présenté par le chlorure d'argent; cependant, il n'est pas resté constant pendant aussi longtemps, et il est possible que les substances tenues en dissolution ou en suspension dans l'eau aient aidé dans cette circonstance à l'action chimique exercée sur l'iodure.

Ces expériences m'ont conduit à penser qu'en prenant pour lames conductrices des lames d'argent ou de métal altérable, et en formant les composés impressionnables par l'action directe des corps, comme l'oxygène, le chlore, le brome et l'iode sur les lames, les conditions seraient meilleures et les effets électriques observés plus énergiques.

Les lames employées ont d'abord été des lames de laiton; exposées dans de l'eau légèrement acidulée à l'influence des rayons solaires, elles ont donné lieu à un courant électrique dû probablement à l'action de la lumière sur l'oxyde de cuivre ou sur un composé cuivreux formé. Ces lames ayant servi préalablement d'électrodes positives dans un liquide contenant un chlorure, sont devenues encore plus impressionnables, et même dans le spectre lumineux elles ont présenté une action depuis le rouge jusqu'au bleu avec un maximum dans le vert; on a vu, page 97, que la partie active du spectre sur le protochlorure de cuivre était à peu près renfermée entre ces limites.

Avec des lames d'argent les effets ont été bien plus énergiques et plus

réguliers ; mais, en outre, on a observé des changements dans la direction du courant électrique produit, suivant la nature ainsi que l'épaisseur de la couche.

En déposant sur une de ces lames une couche mince d'iode, obtenue par l'action de la vapeur d'iode à la température ordinaire, puis en exposant cette lame à la lumière au moyen de l'appareil à compartiment représenté fig. 50, page 122, on a reconnu qu'elle prenait au liquide l'électricité positive; cet effet prouve que la couche d'iodure d'argent est passée à un état d'ioduration moindre.

Avec une couche épaisse d'iode à la surface de l'argent, on a eu, au contraire, un courant électrique inverse du précédent, c'est-à-dire que la lame exposée à la lumière a pris l'électricité négative; ce résultat montre que, dans ce cas, l'iode agit sur l'argent sous l'influence de la lumière. Dans ces diverses expériences, la déviation donnée par le courant électrique était à peu près de 45 à 50° sous l'influence des rayons solaires, et de 10 à 15° à la lumière diffuse.

Avec une couche épaisse d'iode, et les divers écrans de verre coloré dont il a été question plus haut, on a eu :

| Écrans. | Intensité du courant électrique. | Rapport des effets produits. |
|---|---|---|
| Sans écran | 55° | 100 |
| Verre violet | 22 | 40 |
| — bleu | 14 | 25,5 |
| — jaune | 7 | 12,7 |
| — rouge | 1 | 1,8 |

Ainsi, tandis qu'avec le chlorure et le bromure d'argent précipités, placés sur des lames de platine, on avait toujours un courant de même sens, la lame exposée étant positive, avec une couche déposée sur l'argent on a un effet dépendant de l'épaisseur de cette couche. Ces deux effets inverses indiquent qu'il doit y avoir nécessairement une épaisseur pour laquelle l'effet électrique serait presque nul, c'est-à-dire pour lequel le changement chimique serait aussi très-faible. Ce résultat expliquerait peut-être les effets différents obtenus avec des couches minces ou épaisses d'iode et ceux produits dans les rayons rouges extrêmes, comme on l'a vu, page 91 et suivantes.

Avec la vapeur de brôme, la lame d'argent exposée aux rayons solaires est devenue également négative par rapport au liquide comme avec la couche épaisse d'iode. A la lumière diffuse, les effets étaient telle-

ment marqués que la déviation galvanométrique fut de 50°; la lame étant restée exposée à la lumière diffuse pendant 10′, puis mise à l'abri du rayonnement, et exposée de nouveau à son action, la déviation n'a plus été que de 3 ou 4°; la réaction était alors presque terminée.

Une couche de chlorure d'argent, préparée par l'exposition d'une lame d'argent à l'action du chlore, n'a donné qu'un effet assez faible. Cependant, en déposant sur la surface de la lame le sous-chlorure d'argent violet dont la préparation sera indiquée plus loin, on a une substance qui se prête très-bien à ces expériences et qui donne, pendant longtemps, des résultats comparables entre eux, comme on le reconnaîtra dans le dernier chapitre du livre III relatif à la photographie.

On voit donc qu'en déposant certains corps à la surface de lames métalliques, on peut observer les altérations de ces corps sous l'influence de la lumière par l'effet électrique qui se produit alors.

### § 2. *Actinomètre électro-chimique.*

Les résultats précédents permettent de comprendre comment on peut disposer un appareil qui donne l'indication de l'action chimique produite par la lumière sur une substance, au moyen des courants électriques développés lors de cette réaction. Après bien des essais, je me suis arrêté à la disposition qui va être indiquée et qui permet de faire usage des différents composés d'argent impressionnables, mais surtout de l'un d'entre eux, le sous-chlorure d'argent violet, qui permet, comme on le verra plus loin, de reproduire les couleurs naturelles des rayons lumineux (1).

Il est nécessaire de faire usage de lames d'argent recouvertes de la couche impressionnable et plongées dans un liquide conducteur de l'électricité, mais n'attaquant pas cette matière; on peut employer comme liquide l'eau acidulée par l'acide sulfurique, ou une dissolution étendue de sulfate de potasse.

L'expérience a prouvé qu'il faut se servir de lames d'argent le plus pur possible, car, sans cela, la couche impressionnable peut s'altérer dans l'eau acidulée et même dans l'eau ordinaire. J'ai préparé alors des lames avec de l'argent obtenu par la réduction du chlorure, et ne contenant pas de traces de cuivre; ces lames ont 5 centimètres de hauteur,

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, 3me série, t. XXXV, p. 136 (1841). — *Ann. de chimie et de physique*, nouvelle série, t. IX, p. 268, 1843; — t. XXXII, p. 176, 1851.

3 de largeur, et $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur tout au plus. Elles sont soudées chacune à une petite tige d'argent pur, de manière que cette tige soit dans le plan de chaque lame, et au milieu d'un des petits côtés du rectangle qu'elles forment. Ces tiges servent à établir la communication électrique entre les lames et les extrémités d'un galvanomètre à fil long très-sensible. On peut également couper ces lames d'argent dans une feuille de ce métal, de manière à laisser deux appendices qui remplacent les tiges; de cette façon il n'y a pas de soudure, et les lames comme les parties qui les mettent en relation avec le galvanomètre sont de même substance.

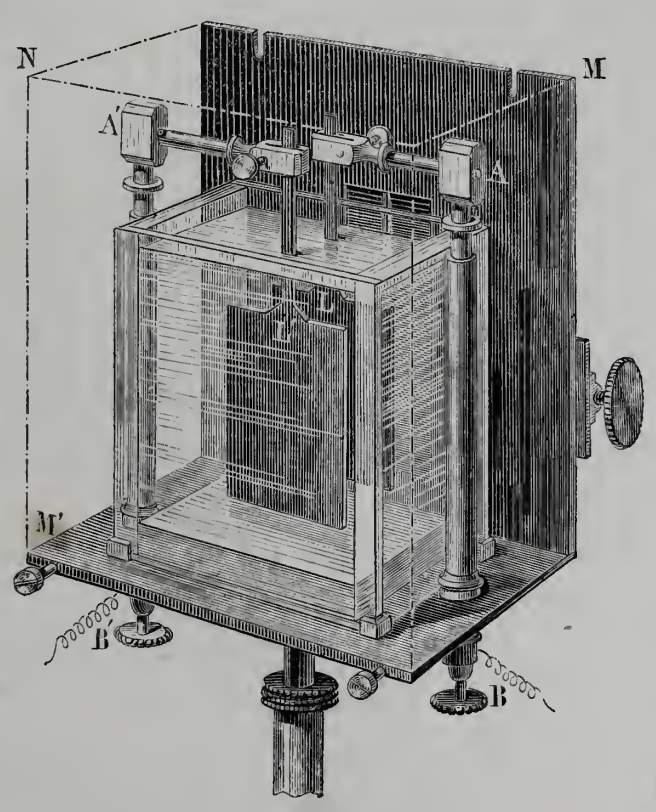


Fig. 51.

La figure 51 donne la disposition de l'appareil. Les deux lames L et L' plongent dans une petite cuve à eau de 6 centimètres de hauteur, sur 6 de largeur et 5 d'épaisseur ; deux montants en cuivre, AB A'B', les maintiennent suspendues au milieu de cette cuve. On les dispose de façon qu'elles soient parallèles à la face antérieure de la cuve à eau, de sorte que, si les trois autres faces de cette cuve sont noircies, ou du moins environnées d'une espèce de boîte en cuivre, et que la lumière arrive seulement par la face antérieure, une seule lame L est exposée à l'action du rayonnement lumineux.

Les deux montants en cuivre AB A'B', qui servent de supports aux lames, sont isolés ou du moins reposent sur des anneaux en ivoire qui sont isolants, de sorte qu'en attachant les extrémités du fil du galvanomètre aux boutons B et B', le circuit électrique se trouve comprendre les deux lames, le liquide de la cuve à eau, les montants en cuivre et le galvanomètre.

Voici les conditions qui ont paru les plus convenables pour obtenir les meilleurs effets :

1° Plus le galvanomètre est sensible, mieux les effets sont manifestes. Un instrument tel que les construit M. Ruhmkorff, ayant un fil de 3000 tours, peut parfaitement servir; cependant un appareil qui est construit avec un fil plus long, renfermant de 20 à 25 mille tours, donne de meilleurs résultats. Les expériences ont été faites successivement avec plusieurs appareils de diverse sensibilité.

2° Le liquide doit être bon conducteur, et ne pas attaquer la couche impressionnable. Un mélange de 2 grammes d'acide sulfurique monohydraté et de 100 grammes d'eau a donné les effets les plus marqués.

3° Les lames d'argent doivent être sans alliage, comme nous l'avons déjà dit, et, de plus, elles doivent recevoir chacune la même préparation. Il est nécessaire, en effet, que ces lames ne soient pas polarisées, et qu'elles soient aussi identiques que possible. Malgré ces précautions, on n'évite pas une polarisation primitive qui fait que, lorsqu'après avoir monté l'appareil dans l'obscurité, on ferme pour la première fois le circuit, l'aiguille est déviée fortement dans un sens ou dans un autre. Avant de commencer les expériences, on doit alors attendre pendant six, douze, vingt-quatre et même quelquefois quarante-huit heures, que l'aiguille ait repris sa première position d'équilibre.

Afin d'éviter les pertes de temps, on a, pour chaque expérience, plusieurs paires de lames préparées toujours ensemble de la même manière, et que l'on conserve en contact l'une avec l'autre dans l'eau acidulée; le courant initial s'anéantit peu à peu, et ensuite on se sert de ces lames pour les expériences dont il sera question plus loin.

J'ai fait usage de couches d'iodure, de bromure et de chlorure d'argent, et l'on verra dans le paragraphe suivant quels sont les effets observés dans le spectre solaire avec l'iodure déposé en couches minces comme celles que recouvrent les plaques daguerriennes; les effets électriques sont alors très-énergiques. Mais les couches épaisses des substances impressionnables donnent des effets semblables, dont la durée est plus grande et l'actinomètre peut, pendant beaucoup plus longtemps, donner des effets comparables; sous ce rapport, la couche de sous-chlorure d'argent violet a présenté les actions les plus régulières; d'un autre côté, comme cette substance est sensible entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine, son étude peut s'appliquer aux rayons que nous pouvons percevoir. En raison de ces motifs, j'ai étudié plus spécialement la construction de l'actinomètre avec ce composé impres-

sionnable, et j'entrerai dans quelques détails sur les indications que peut donner cet appareil.

On sait que les deux procédés auxquels je me suis arrêté pour la préparation des lames d'argent recouvertes de sous-chlorure violet, sont : 1° l'immersion dans une solution étendue de bichlorure de cuivre; 2° l'action d'un courant électrique, la lame d'argent à recouvrir servant d'électrode positive dans une solution d'acide chlorhydrique étendue. (Voir chapitre IV du livre III relatif à la photographie.)

Le premier procédé donne une couche qui reçoit plus vivement les impressions colorées; le second donne des couleurs plus brillantes. J'ai fait successivement usage de ces deux modes de préparation, et j'ai abandonné le premier, à l'exclusion du second, par le motif que les effets électriques, sans être énergiques, sont de beaucoup moindre durée, comme on l'expliquera bientôt. On doit donc, pour la préparation, employer le courant provenant d'un couple à acide nitrique, de grandeur ordinaire, et attacher successivement la tige de chaque lame au fil conducteur positif; les lames sont plongées dans une solution formée par un mélange d'eau et de $\frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{10}$ en volume d'acide chlorhydrique ordinaire. Les lames doivent être polies et parfaitement décapées sur les deux faces, comme si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne. Lorsque l'on a plongé dans le liquide une tige de platine en communication avec le pôle négatif du couple, le circuit se trouve fermé, la lame d'argent noircit en prenant des teintes foncées correspondantes aux teintes des lames minces. On s'arrête au violet du quatrième ordre, et on lave à grande eau. Pour avoir une teinte homogène, on doit placer la tige négative de platine assez loin de la lame, et tourner sans cesse la lame d'argent en la tenant à la main par son appendice. En plaçant un voltamètre à eau dans le circuit, on peut estimer exactement la quantité de chlore dont on recouvre la lame.

Quand on juge que les deux lames ont reçu la même préparation, on les soumet à l'action de la chaleur, comme on l'expliquera plus tard, et afin qu'elles soient modifiées physiquement de façon à donner de bonnes impressions colorées du spectre; pour cela, on les recuit à la température de 150 à 200 degrés, jusqu'à ce qu'elles deviennent rosâtres, et alors on les attache aux deux montants en cuivre. Le recuit a aussi pour but de faire que les lames ne soient pas impressionnées en dehors des limites de réfrangibilité du rayonnement lumineux, comme cela aurait lieu sans cette action. Telles sont les précautions indis-

pensables pour pouvoir obtenir de bons résultats par suite de l'action des rayons lumineux.

Il est nécessaire de placer en avant de la face antérieure de la cuve à eau un écran **M** muni d'une ouverture longitudinale, soit verticale, soit horizontale, et dont on peut régler la dimension à volonté à l'aide d'une vis micrométrique, afin de n'éclairer qu'une portion déterminée de la surface de la lame d'argent antérieure L. On peut également, au moyen de verre noirci, empêcher que toute la lumière, même réfléchie, ne parvienne à la seconde lame qui doit rester constamment dans l'obscurité. Cependant cela n'est pas toujours nécessaire, car, en mettant une enveloppe métallique M N M′ autour de l'appareil comme l'indique, par les lignes ponctuées, la figure 51, page 131, les rayons ne viennent que par l'ouverture antérieure et ne peuvent affecter que la lame L qui est en avant.

Quand tout est ainsi disposé, si l'aiguille du galvanomètre est revenue au zéro, ou en est très-proche par suite de la destruction du courant initial que l'on observe presque toujours, on peut procéder aux expériences.

Dans ces conditions, lorsque l'appareil est dans une chambre obscure, et qu'on vient à faire tomber tout à coup les rayons solaires sur la surface entière de la lame antérieure (surface de vingt centimètres carrés), l'aiguille du galvanomètre est chassée violemment dans un sens que nous allons préciser. Si l'on intercepte la lumière, l'aiguille revient peu à peu au zéro. L'action est donc tellement vive, qu'il faut ne laisser impressionner qu'une très-petite portion de la lame par les rayons solaires directs pour avoir seulement 20 ou 30 degrés de déviation de l'aiguille du galvanomètre.

La lumière d'une bougie, placée à 1 décimètre de la cuve à eau, suffit pour faire dévier l'aiguille aimantée de 12 à 15 degrés.

La déviation, qui est constamment dans le même sens tant que les rayons lumineux frappent l'appareil, indique que la lame exposée au rayonnement prend l'électricité négative, et le liquide l'électricité positive. Si c'est l'autre lame qui est éclairée, le même effet se produit, mais l'aiguille dévie en sens inverse. Dans cette circonstance, le courant est inverse de celui qui a lieu lorsque les lames sont recouvertes d'une couche mince d'iode; dans ce dernier cas, les rayons solaires donnent lieu à une décomposition, et la lame d'argent prend l'électricité positive. Quand la couche d'iode est épaisse, l'effet est inverse,

comme on l'a vu dans le paragraphe précédent. On ne peut s'expliquer cette différence que par la modification profonde que le recuit a apportée à la matière, comme les impressions colorées l'avaient déjà indiqué. Ce qui vient le démontrer encore, c'est qu'ayant opéré avec des lames préparées à la pile et non recuites, on a eu un effet électrique inverse, la lame exposée à la lumière ayant donné l'électricité positive; mais, après les avoir fait recuire, les indications électriques ont changé de sens, et les lames éclairées ont pris l'électricité négative, comme si elles étaient attaquées par le liquide au moment de l'action de la lumière. Ces résultats, joints à la plus grande sensibilité de la matière, et à la destruction des effets qui se produiraient en dehors des rayons rouges et violets, ont fait adopter les plaques recuites dans toutes les expériences de ce genre.

Lorsque la lumière diffuse, ou bien la lumière solaire, impressionne la lame, on a une déviation plus ou moins forte qui demeure constante tant que la lumière conserve la même intensité, et que la surface est suffisamment impressionnable. Si l'on vient à intercepter la lumière, l'aiguille aimantée du galvanomètre revient au zéro, le dépasse un peu en sens inverse, par suite probablement d'un courant secondaire, mais reprend bientôt sa première position d'équilibre. Si la lumière a conservé son intensité primitive, et qu'on éclaire de nouveau la lame, alors l'effet électrique est le même que précédemment.

La déviation n'est constante, on le pense bien, que tant que la surface conserve la même impressionabilité, et les résultats ne peuvent être comparables qu'autant que l'on remplit cette condition. Aussi est-il nécessaire de donner une épaisseur assez forte à la couche sensible.

J'ai reconnu, comme je l'ai dit précédemment, que, lorsque la lame impressionnable est préparée par une immersion rapide dans le bichlorure de cuivre, puis recuite, elle blanchit rapidement sous l'influence des rayons solaires ou des rayons émanés d'une lampe, et, quelques minutes après, sous la même intensité lumineuse elle donne un courant électrique beaucoup plus faible. Mais, quand elle est recouverte par la pile d'une couche épaisse impressionnable, et recuite dans les mêmes conditions, le courant est constant pendant un temps assez long. Je citerai, à cette occasion, l'expérience suivante :

On a placé à 50 centimètres de distance de la lame antérieure de l'appareil une forte lampe Carcel, dont la lumière, réfractée par une lentille, venait tomber sur la lame. L'aiguille du galvanomètre, dans sa

position d'équilibre, était à + 1 degré. Aussitôt que les rayons de la lampe tombèrent sur la lame, la déviation fut, par première impulsion, de + 16°,5, puis l'aiguille se fixa à + 14 degrés. En laissant continuer l'action, on eut, aux heures indiquées ci-après, les déviations contenues dans la seconde colonne :

| Heures. | Déviations définitives. |
|---|---|
| $8^h\ 40^m$ | 14° |
| 9 40 | 16 |
| 10 0 | 14 |
| 11 30 | 13 |

A ce moment on retourna la lame; la partie qui n'avait pas été impressionnée, étant à son tour exposée à la lumière, donna 13 degrés de déviation.

Un écran ayant intercepté la lumière à $11^h\ 30^m$, l'aiguille revint à + 1 degré. Ainsi, le courant électrique a conservé sensiblement la même intensité par une action continue des rayons de la lampe pendant trois heures. Les faibles variations peuvent se rapporter aux changements de température du liquide de la cuve à eau qu'il faut avoir soin d'éviter dans les expériences de ce genre.

La lumière solaire donne lieu aux mêmes effets, mais avec plus d'énergie; il est donc nécessaire de modérer l'intensité lumineuse qui, sans cela, impressionnerait trop vivement la lame, et ferait diminuer plus rapidement l'intensité du courant électrique.

Il est évident, d'après ces expériences, que, lorsque l'on ne fait agir la lumière sur la lame que pendant une minute ou deux, de façon à avoir seulement la déviation définitive de l'aiguille du galvanomètre, et qu'on soustrait ensuite la lame impressionnable à l'action des rayons, on peut conserver, pendant au moins un jour, la même sensibilité à l'appareil, et faire un grand nombre d'expériences comparatives capables d'indiquer si l'intensité de la source lumineuse a changé.

Les déviations de l'aiguille aimantée, ou du moins les intensités du courant électrique, ne peuvent être considérées comme proportionnelles à l'intensité de l'action chimique exercée sur la substance et par conséquent à l'intensité lumineuse active; elles indiquent seulement si cette intensité lumineuse est plus grande ou plus petite, dans une circonstance que dans une autre. On verra, dans le dernier paragraphe de ce

chapitre, page 144, comment on pourrait se servir de cet appareil pour comparer entre elles les intensités lumineuses.

§ 3. *Effets électriques dus à l'action des rayons différemment réfrangibles sur l'iodure d'argent et le sous-chlorure d'argent violet.*

L'actinomètre que l'on vient de décrire peut mettre en évidence l'action exercée par les rayons solaires différemment réfrangibles sur diverses substances impressionnables recouvrant les lames d'argent, car les effets sont comparables pendant un temps assez long, si l'on observe les précautions indiquées plus haut.

Pour ne laisser pénétrer sur la lame qu'une portion bien déterminée du spectre solaire, on a placé, en avant de la cuve à eau, fig. 51, un écran muni d'une fente verticale de $2^{mm},5$ d'ouverture, de sorte que la portion impressionnée de la lame se trouvait bornée à un rectangle de $2^{mm},5$ de base sur 5 centimètres de hauteur.

On a formé un spectre bien épuré, en faisant pénétrer les rayons solaires réfléchis par un héliostat à travers une fente mince et verticale du volet de la chambre obscure, et en les réfractant dans un prisme de flint. Derrière ce prisme, situé à 1 mètre du volet, se trouvait une lentille de $0^{m},60$ de foyer, qui a donné, à une certaine distance, un spectre avec toutes ses raies. Le spectre à l'aide duquel on a agi avait à peu près 3 centimètres et demi de largeur dans la direction parallèle aux raies, et 10 à 11 centimètres de longueur, depuis la raie A jusqu'à H, ses dimensions ayant varié un peu dans chaque série d'opérations. Il résulte de là qu'à chaque expérience, un quarantième de la longueur du spectre tombait sur la partie de la lame impressionnable qui devait être influencée par le rayonnement lumineux.

La cuve à eau était disposée sur un chariot, et se déplaçait au moyen d'une vis micrométrique le long d'une règle divisée parallèlement à la longueur du spectre; on pouvait donc apprécier, à chaque instant, la position de l'appareil. Par une expérience préliminaire, on déterminait directement à quelles divisions de la règle se trouvait l'appareil, quand les raies principales du spectre D, E, F, G se présentaient au milieu de l'ouverture de l'écran placé devant la cuve; ensuite, à l'aide d'un calcul fort simple, on en déduisait les positions des autres raies ou des autres parties du spectre. Chaque fois qu'on arrêtait l'appareil dans une position déterminée, l'effet produit correspondait donc à une

partie du spectre égale à $\frac{1}{40}$ de sa longueur, et, par conséquent, il y avait empiétement des parties voisines, puisque la plaque était également impressionnée par les rayons qui étaient à droite et à gauche de ceux dont la position se trouvait indiquée par le centre de l'ouverture; cet effet serait d'autant moindre que la largeur de l'ouverture serait plus petite, mais, pour avoir des effets d'une certaine intensité, on est obligé de ne pas trop la diminuer; on voit néanmoins quelle est l'approximation à laquelle on peut arriver.

On a fait ainsi différentes séries d'expériences, en opérant avec les lames recouvertes d'iodure d'argent en couches minces, et avec les lames recouvertes de sous-chlorure d'argent violet, préparé comme on l'a indiqué dans le paragraphe précédent. On a cherché les déviations du galvanomètre, mais en s'arrangeant pour qu'elles ne dépassent pas 20 à 25°, afin que les intensités des courants produits soient toujours proportionnelles aux déviations observées. Les indications, comme on l'a dit plus haut, donnent les effets plus ou moins intenses et permettent de connaître la position des maxima d'intensité ainsi que les limites d'action de la lumière sur les lames; mais il n'est pas démontré que les intensités des rayons actifs soient proportionnelles aux intensités du courant électrique produit.

Les expériences suivantes ont été faites à l'aide d'une plaque d'argent iodurée : supposons l'aiguille du galvanomètre fixe, le spectre solaire également fixe, un écran opaque placé devant la lame iodurée et la cuve à eau au-delà des rayons rouges; si l'on fait mouvoir la cuve à eau au moyen de la vis micrométrique jusqu'au moment où l'on est dans le rouge vers la raie A, qu'on arrête la cuve, qu'on enlève l'écran opaque, alors les rayons de l'extrême rouge frappent la lame et on ne voit aucune déviation dans le galvanomètre; on remet l'écran, on fait avancer un peu l'appareil et on l'arrête vers la raie B dans l'orangé, on ôte de nouveau l'écran, et, la lame étant frappée par les rayons orangés, on ne voit pas encore l'aiguille du galvanomètre se dévier. En continuant ainsi, on ne parvient à distinguer une action que lorsque les rayons du commencement du bleu, vers F, frappent la lame. Quelquefois, on a bien faible action dans le vert et le jaune, mais probablement, comme on le verra plus loin, en raison d'une impression primitive de la lame par la lumière diffuse.

Lorsque les rayons bleus frappent la lame, on reconnaît, par la déviation de l'aiguille, une action assez marquée qui va en augmentant à

mesure que l'on approche du violet. Le maximum d'effet est atteint entre G et H, et dans cette région, on peut même avoir 20 ou 30° de déviation et même davantage suivant la préparation de la lame et la sensibilité du galvanomètre. Au-delà de H, l'action décroît jusque vers P, au-delà du violet; plus loin, il n'y a plus d'effet appréciable.

Il est indispensable, après chaque observation, de replacer l'écran opaque devant la lame, et de ne laisser cette lame découverte que pendant quelques secondes, c'est-à-dire pendant le temps nécessaire pour estimer la déviation de l'aiguille du galvanomètre; alors on remet l'écran et on fait avancer plus loin l'appareil. Il faut agir ainsi afin que la lame ne soit pas trop impressionnée et qu'elle puisse présenter les mêmes résultats, dans des circonstances semblables, pendant toute la durée d'une série d'expériences.

Si l'on fait revenir la cuve à eau en sens inverse, on repasse dans toutes les parties du spectre solaire, mais en entrant par l'extrémité la plus réfrangible ou violette; alors, on retrouve successivement dans les rayons situés depuis P jusqu'en F, au commencement du bleu, les mêmes déviations pour les mêmes positions de l'actinomètre, à moins que l'intensité lumineuse n'ait changé; mais, quand on a choisi un ciel pur, les observations se font très-rapidement et l'on peut éviter cette cause d'erreur. En avançant dans le vert, près de E, on observe alors des effets plus marqués que précédemment dans ces mêmes rayons, et on trouve maintenant une action dans le jaune, l'orangé et le rouge, là où primitivement il n'y en avait aucune, et, au-delà de A, on ne distingue plus aucun effet; de sorte que entre F et A on reconnaît une partie active d'une certaine étude dont le maximum paraît être entre D et E.

Voilà donc un effet qui se manifeste dans la partie la moins réfrangible du spectre où, précédemment, il ne s'en était manifesté aucun. Cela vient de ce que, lors du premier passage de la lame dans l'image prismatique, l'iodure n'avait pas été impressionné, et que, dans le retour en sens contraire, ayant été soumis à l'action des rayons les plus réfrangibles, cet iodure devient impressionnable par la partie la moins réfrangible, en donnant lieu aux effets de continuation dont on a déjà parlé antérieurement pages 76, 83 et suivantes.

Si l'on expose de nouveau la lame dans la partie violette du spectre, qu'ensuite on la transporte dans les rayons les moins réfrangibles, on observe, pour les mêmes positions de l'actinomètre, des déviations plus considérables que la seconde fois, tandis que dans les rayons les plus

réfrangibles on retrouve les mêmes nombres de degrés de déviation. Une nouvelle exposition de la lame dans les diverses parties du spectre donne les mêmes résultats, c'est-à-dire qu'à mesure que la lame est plus impressionnée, l'action des rayons les moins réfrangibles ou agissant comme continuant une action commencée, est plus intense, tandis que celle des rayons les plus réfrangibles reste la même (1).

Cette augmentation d'action des rayons entre les lignes A et F va jusqu'à une certaine limite, de sorte que l'action maximum des rayons les moins réfrangibles ne dépasse guère l'action maximum des rayons excitateurs ou les plus réfrangibles.

Il faut avoir soin, ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, que dans chaque expérience la portion de la lame qui est derrière l'écran ne reste exposée dans la partie du spectre que l'on explore que pendant le temps nécessaire à l'observation de la déviation de l'aiguille aimantée, car alors la même lame exposée un grand nombre de fois dans les mêmes conditions d'éclairement, donne sensiblement lieu à la même déviation. Ce n'est qu'après avoir été très-fortement impressionnée qu'elle ne donne plus un courant électrique de même intensité.

On voit qu'à l'aide de ces effets, on retrouve la même action que celle qui avait été obtenue par le changement de teinte de l'iodure d'argent, pages 76, 83 et suivantes, et on reconnaît qu'il y a pour ainsi dire deux parties actives du spectre : l'une, située dans la partie la plus réfrangible du spectre solaire, a son maximum entre G et H, se termine d'un côté en F et de l'autre en P, et agit toujours avec la même intensité; l'autre est située depuis F jusqu'en A, a son maximum entre D et E, n'agit que sur l'iodure déjà impressionné, et a une action d'autant plus intense que la substance est plus impressionnée, jusqu'à ce que l'effet maximum qu'elle peut produire atteigne à peu près la valeur du maximum d'effet de la première partie.

On doit remarquer qu'il n'y a pas d'action inverse dans l'extrême rouge et en dehors du rouge, ou du moins que le courant électrique produit ne change pas de sens; il faut en conclure que le phénomène curieux observé lors de la coloration des papiers sensitifs, ainsi que de la fixation de la

(1) Ce résultat explique pourquoi, lorsque l'on continue, à l'aide des verres colorés en rouge ou en jaune, une image obtenue sur l'iodure d'argent, mais seulement commencée à la chambre obscure, cette image vient avec le même décroissement de lumière que l'on aurait obtenu en laissant la lame exposée plus longtemps à la chambre obscure; car les rayons qui traversent ces verres réagissent d'autant plus fortement sur les lames que certaines parties de l'iodure ont été plus impressionnées.

vapeur de mercure, et qui a été signalée comme action négative, comme on l'a vu page 92, ne correspond pas à un changement dans la direction du courant électrique. On doit observer toutefois que, dans les expériences faites antérieurement par l'apparition des images, on opère dans l'air; ici on opère dans l'eau, et il est possible que ce changement de milieu influe sur l'effet particulier qui se produit à l'extrême rouge; c'est un sujet qui mérite d'être étudié.

J'ai fait plusieurs séries d'expériences analogues aux précédentes en substituant aux lames d'argent iodurées des lames recouvertes de sous-chlorure d'argent violet, préalablement recuit, ainsi qu'on l'a dit dans le paragraphe précédent; j'ai même employé, à la place des lames, des fils d'argent bien décapés et recouverts de sous-chlorure, de sorte qu'une partie de la surface cylindrique du fil antérieur était seule impressionnée et que la surface exposée à l'influence lumineuse était très-étroite; les résultats ont été les mêmes qu'avec les lames.

En plaçant successivement l'actinomètre dans les différentes parties du spectre, on n'a eu d'effet sensible qu'entre les limites des réfrangibilités A et H; en dehors du rouge et au-delà du violet, il n'y a pas eu de courant produit. Quant au maximum d'action, il s'est trouvé sensiblement à la même place que celui des rayons les moins réfrangibles qui continuent à impressionner l'iodure d'argent, c'est-à-dire dans le vert.

Le tableau suivant donne, en résumé, les intensités du courant observé avec des lames iodurées ou recouvertes de sous-chlorure placées successivement dans un spectre formé avec un prisme de flint blanc. On n'a représenté que le rapport des intensités électriques observées à celle du maximum avec chaque substance, et l'on a supposé que dans chaque cas cette action maximum était égale à 100; on se rappelle qu'avec l'iodure d'argent suffisamment impressionné les deux maxima arrivent à être égaux. On y a joint les intensités lumineuses déterminées dans chaque région du spectre par Fraünhoffer, intensités qui se rapportent à des rayons de toutes couleurs et qui, pour ce motif, ne sauraient avoir la précision des déterminations faites en comparant des rayons de même nuance :

| SPECTRE SOLAIRE. | | Intensité lumineuse. (1). | INTENSITÉ ÉLECTRIQUE OBTENUE | |
|---|---|---|---|---|
| Couleurs principales. | Raies principales | | Avec l'iodure d'argent déjà impressionné. | Avec le sous-chlorure d'argent violet. |
| Rouge extrême. | A | insensible. | 5 | à peine sensible. |
| Rouge orangé. | B | 3,2 | 20 | 20 |
| — | C | 9,4 | 32 | 35 |
| Jaune. | D | 64,0 | 68 | 75 |
| Vert. | » | 100 { maxim. à peu près à 0,3 de D E à partir de D. } | » | » |
| — | » | » | 100 { Maximum à 0,6 de la distance D E à partir de D. } | 100 max. à 0,6 de D E. |
| — | E | 48,0 | 75 | 85 à 90 ? |
| Commencement du bleu. | F | 17,0 | 25 | 73 |
| » | » | » | 20 { Minim. près de F entre F et G. } | » |
| Bleu indigo. | G | 3,1 | 65 | 19 |
| » | » | » | 100 { Max. à peu près à 0,4 de G H à partir de G. } | » |
| Violet extrême. | H | 0,6 | 72 | à peine sensible. |
| » | I | » | 40 | » |
| » | M | » | 27 | » |
| » | N | » | 17 | » |
| » | O | » | 13 | » |
| » | P | » | 5 | » |
| » | » | » | » | » |

Quoique les intensités des courants électriques ne puissent servir à mesurer l'intensité des rayons actifs, on peut, à l'aide de leur comparaison, juger de la position des maxima et des minima d'action et connaître l'étendue des parties actives de l'image prismatique sur les deux substances impressionnables qui recouvrent les lames d'argent. Il est facile, pour mieux se représenter les phénomènes, de figurer graphiquement les courbes d'intensités des courants électriques et celle de l'intensité lumineuse.

Dans la figure 52, représentée ici, la ligne horizontale A H P représente les positions des différentes parties du spectre obtenu avec un prisme de flint. Les lettres B, C, D, H, etc., correspondent aux raies noires qui portent leur nom. Les ordonnées ont été supposées proportionnelles aux nombres inscrits dans le tableau précédent; le maximum a été pris

(1) Les nombres compris dans cette colonne sont extraits du mémoire de Fraünhoffer cité 1er volume, page 130.

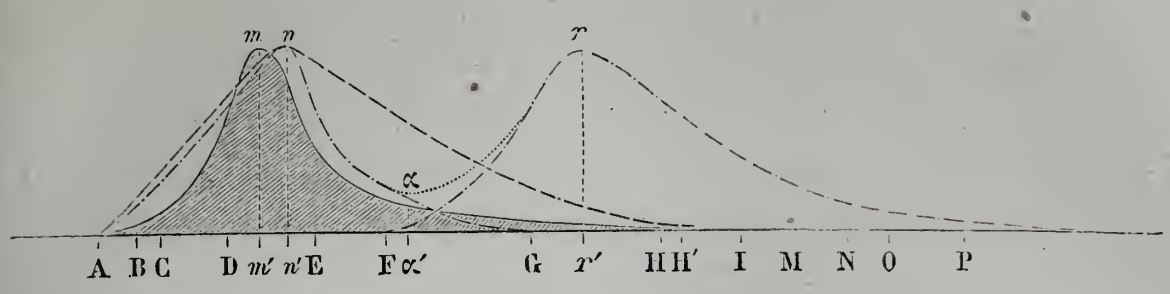



Fig. 52.

arbitrairement et l'on a admis, pour plus de simplicité, que pour l'intensité lumineuse l'ordonnée mm′, correspondant à ce maximum, a la même valeur que les ordonnées nn′, rr′ qui sont relatives aux déviations du galvanomètre. AmH figure la courbe des intensités lumineuses; la ligne AnH, représentée par des traits interrompus, celle des intensités électriques lorsque l'actinomètre a pour substance active le sous-chlorure d'argent; et A n α r′ P, la courbe des intensités électriques quand on se sert de l'iodure d'argent déjà impressionné; cette dernière ligne est formée de points et de traits alternants ensemble. Comme on l'a vu plus haut, les maxima des parties les moins réfrangibles sont sensiblement à la même place en nn′.

La courbe relative à l'iodure d'argent offre deux maxima d'intensité et un minimum en αα′. Si la lame n'a pas été impressionnée, la courbe FrP donne la position de la partie active; si la lame a été impressionnée, alors il vient s'ajouter la courbe An α G.

Les expériences de Fraünhoffer, sur la mesure des intensités lumineuses du spectre, placent le maximum de lumière près de D. Si les effets accusés par l'actinomètre sont d'autant plus énergiques que la lumière est plus intense, ils indiqueraient donc pour maximum, dans le cas du sous-chlorure violet, une région plus éloignée de D et plus près de E. On ne pourra être fixé sur la position exacte du maximum d'intensité lumineuse, que lorsque, à l'aide d'un procédé photométrique permettant de comparer des lumières de nuances différentes, on aura déterminé les intensités lumineuses des différentes parties du spectre. Jusqu'à présent, on ne peut donc pas se prononcer sur la coïncidence ou la non-coïncidence de la position du maximum d'action sur la matière sensible qui reproduit les couleurs naturelles des corps et de celle du maximum de lumière; néanmoins, ils diffèrent peu. D'un autre côté, les courbes A m H et An H ne sont pas semblables; mais, pour faire la comparaison d'une manière précise, il faudrait que l'on pût

évaluer la quantité d'effet chimique produit et non pas l'intensité d'un courant qui n'en peut donner la mesure immédiate.

§ 4. *Comparaison entre l'intensité lumineuse active et l'intensité du courant électrique produit lors de l'altération du sous-chlorure d'argent.*

On a pu voir, dans les paragraphes précédents, que les lames d'argent recouvertes de sous-chlorure chromatiquement impressionnable, et préparées convenablement, donnent lieu à des effets électriques toutes les fois que les rayons émanés du soleil ou d'une source artificielle viennent les frapper; ces surfaces sont sensibles, comme on l'a vu, entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine. Si l'on remarque, en outre, qu'en donnant à la couche impressionnable une épaisseur convenable, on obtient un courant électrique dont l'intensité reste la même pendant un temps plus ou moins long lorsque l'intensité lumineuse est constante, on pourra concevoir la possibilité de se servir de ces phénomènes pour comparer, dans quelques circonstances, l'intensité de la lumière. Il faudrait, pour que l'appareil pût servir de photomètre, que la courbe des intensités chimiques sur cette matière fût la même que celle des intensités lumineuses, quand on compare les actions exercées dans les différentes parties du spectre solaire; il est possible qu'il en soit ainsi, mais on a vu dans le paragraphe précédent que les résultats obtenus ne permettaient pas de le démontrer. En tout cas, relativement aux rayons actifs sur cette matière, l'emploi de l'actinomètre électro-chimique est analogue à celui de la pile thermo-électrique pour les rayons calorifiques.

On doit examiner d'abord, comment le courant électrique varie lorsque l'intensité lumineuse change. On pourrait former une table des intensités du courant électrique; mais ce procédé, pour le cas actuel, ne me paraît pas susceptible d'une grande précision. J'ai placé alors, en avant de la cuve à eau contenant les lames sensibles de l'actinomètre, un écran à ouverture variable; cette ouverture était large de 4 centimètres et sa hauteur variait depuis 0 jusqu'à 4 centimètres. On a pu atteindre ce but, en rendant mobile une lame de cuivre, à bords bien dressés, à l'aide d'une vis micrométrique à tête divisée. Ce procédé permet de mesurer, à un centième de millimètre près, la hauteur de l'ouverture variable de l'écran.

Cela fait, on a mis l'appareil actinométrique sur un petit chariot,

comme dans les expériences précédentes, ce chariot pouvant s'approcher ou s'éloigner le long d'une règle divisée. On a disposé cette règle de façon à ce que les rayons solaires réfléchis sur un héliostat pénètrent dans la chambre obscure parallèlement à la règle, et viennent frapper la lame impressionnable quand il n'y a aucun écran interposé entre le volet et l'instrument. Une fois ces premières dispositions prises, on a placé sur le trajet du faisceau lumineux une lentille à court foyer, à l'aide de laquelle les rayons se réfractent, et vont en divergeant à partir du foyer de la lentille. On conçoit donc qu'en recevant la lumière à des distances connues de ce foyer, ce qui est facile à l'aide de la règle divisée, on puisse, par un calcul fort simple, connaître les rapports d'intensité lumineuse des rayons actifs. Si la lentille est à court foyer, on peut, en ne considérant que des distances supérieures à 20 ou 30 centimètres, regarder le foyer lumineux comme un point, et alors les intensités lumineuses sont en raison inverse des carrés des distances de l'appareil au foyer de la lentille.

Le procédé suivi dans la série d'expériences ci-après mentionnée consiste à diminuer ou à augmenter l'ouverture de l'écran à l'aide de la vis micrométrique, c'est-à-dire à augmenter ou à diminuer l'étendue de la surface impressionnée suivant des quantités connues, de façon à ce que la déviation du galvanomètre reste constante. En prenant 30 degrés pour cette déviation constante, on a eu les résultats suivants :

| Distance de la lame au foyer de la lentille. Centimètres. | Rapport I, des intensités lumineuses. | Largeur H, de l'ouverture de l'écran. | Produit I. H. |
|---|---|---|---|
| 20 | 1 | 8,10 | 8,10 |
| 30 | 0,444 | 12,26 | 5,44 |
| 40 | 0,250 | 19,40 | 4,85 |
| 50 | 0,160 | 26,51 | 4,24 |
| 60 | 0,111 | 32,00 | 3,55 |

On voit qu'il n'y a aucun rapport simple entre l'intensité lumineuse et l'étendue que l'on doit donner à une lame pour obtenir le même courant électrique, le produit de l'intensité lumineuse par la hauteur de l'ouverture qui représente un nombre proportionnel à la surface n'étant pas constant. Ainsi, une surface chimiquement sensible d'une étendue double, impressionnée par un faisceau de rayons lumineux d'une intensité moitié

moindre, ne donne pas lieu à un courant électrique de même intensité, mais à un courant plus énergique. On ne peut donc pas se servir de la mesure de l'étendue de la surface impressionnée pour comparer immédiatement les intensités lumineuses actives. Il est possible qu'il existe une relation entre ces deux expressions, mais je n'en ai pas trouvé de simple pouvant s'appliquer entre des limites très-différentes d'intensité.

L'expérience suivante conduit également à la même conclusion : on a mis l'appareil à une distance telle, que la lame était à 30 centimètres du foyer de la lentille. Pour maintenir la déviation de l'aiguille aimantée à + 29 degrés, il a fallu ouvrir l'écran mobile de 17 millimètres. On a alors augmenté l'ouverture de l'écran : avec 32 millimètres d'ouverture, l'aiguille du galvanomètre s'est déviée de 73 degrés; mais en éloignant l'appareil le long de la règle divisée l'aiguille aimantée s'est rapprochée de zéro; pour qu'elle se maintînt à + 29 degrés, il a fallu s'arrêter à 44,1 millimètres du foyer de la lentille.

Le rapport des intensités lumineuses, dans cette expérience, est de $\left(\frac{44,1}{30}\right)^2 = 2,15$. Dans le premier cas le rapport des surfaces impressionnées est $\frac{32}{17} = 1,88$.

Les résultats obtenus avec une lampe n'ont conduit également à aucune proportionnalité entre les intensités lumineuses et les surfaces impressionnables. Au lieu de se servir d'un cône de rayons divergents, il serait intéressant de faire des expériences analogues au moyen de la lumière polarisée et en faisant varier les intensités lumineuses à l'aide de prismes bi-réfringents.

On peut néanmoins faire usage de l'actinomètre pour comparer les intensités lumineuses d'un même faisceau de rayons ou de faisceaux différents; il suffit pour cela que l'on opère toujours sur la même étendue de substance impressionnable ou sur la même lame sensible, et que l'on fasse varier, d'après un procédé connu, l'intensité du faisceau de rayons actifs jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre indique toujours la même déviation. Le moyen le plus simple pour atteindre ce but consisterait à projeter, avec une lentille, les rayons lumineux sur une étendue constante de la lame antérieure de l'actinomètre, et, à l'aide d'une ouverture à bords mobiles placée sur la route des rayons rendus parallèles, à faire varier la largeur du faisceau incident et par conséquent l'intensité de ce

faisceau, qui agirait toujours sur la même surface. L'appareil, dont on peut augmenter beaucoup la sensibilité en le mettant en rapport avec un galvanomètre suffisamment délicat, servirait donc à constater le moment où chaque faisceau aurait la même intensité d'action. C'est de cette manière que l'on devrait opérer, et l'actinomètre électrochimique pourrait alors être employé comme un photomètre.

# CHAPITRE IV.

## Comparaison entre les intensités des rayons de diverses sources lumineuses agissant sur les substances impressionnables. Extinction des rayons actifs.

### § 1er. *Méthodes de comparaison.*

Chaque substance chimiquement impressionnable est sensible entre des limites différentes de réfrangibilité et a pour ainsi dire son spectre d'action, de sorte que deux sources lumineuses, ou deux faisceaux de rayons inégalement réfrangibles, produisent des effets très-divers suivant la nature des corps impressionnés. Ainsi, considérons un faisceau de lumière verte et un faisceau de rayons ultra-violets : le premier pourrait produire un effet très-énergique sur le sous-chlorure d'argent et sur la rétine, tandis que le second serait presque sans action ; le premier donnerait une coloration à une feuille de papier, recouverte d'acide chromique, coloration qui serait moins vive avec l'autre faisceau ; cette lumière verte ne produirait aucun effet sur la résine de gaïac ni sur le chlorure d'argent, tandis que l'action de la lumière violette serait à son maximum sur ces deux substances ; de sorte que les comparaisons que l'on peut effectuer, en se servant de telle ou telle substance, doivent être considérées comme particulières à cette substance, ou du moins aux matières qui sont influencées comme elle. Ces résultats expliquent pourquoi les effets de la lumière diffuse peuvent être différents sur les corps impressionnables et sur la rétine, car des rayons ultra-violets peuvent manquer sans que l'intensité des rayons visibles paraisse différente.

On pourrait se servir d'une des réactions produites sous l'influence de la lumière et dont il a été question dans le premier chapitre de ce livre, pour étudier l'intensité des rayons actifs, mais pourvu que la quantité d'action chimique puisse être appréciée. On a fait usage, soit des phénomènes de coloration, soit de la mesure du volume d'un gaz dégagé, soit du poids d'un sel insoluble ou d'un précipité formé, c'est-à-dire d'une action chimique définie.

On a fréquemment employé la coloration d'une feuille de papier recouverte d'un sel d'argent, coloration qui est plus ou moins vive suivant l'intensité des rayons qui ont agi pendant le même temps, ou bien suivant la plus ou moins grande durée de l'action des rayons, en supposant qu'ils aient conservé la même intensité. Pour connaître le degré de coloration de la matière sensible, on a formé une échelle de tons au moyen d'un certain nombre de bandes de papier que l'on a colorées avec des nuances de plus en plus foncées, reproduisant les différentes teintes que prend le papier sensible quand il est exposé à l'action continue de la lumière; en approchant alors le papier impressionné de la surface sur laquelle se trouve l'échelle colorée, on juge du plus ou moins d'altération de la substance.

Pour que cette méthode puisse donner des résultats comparables entre eux, il est nécessaire que le papier photographique soit préparé toujours de la même manière, et ait toujours à peu près le même degré d'hygroscopicité; sans cela, dans les mêmes conditions il pourrait être plus ou moins sensible. Mais, en admettant qu'il se trouve toujours dans le même état physique, il est aisé de comprendre que surtout en faisant usage des papiers ordinaires de chlorure, de bromure ou d'iodure d'argent, on ne peut avoir que des indications en plus ou en moins sur l'effet chimique de la lumière, et non pas des déterminations d'intensité comparatives. On pourrait, par exemple, chercher dans chaque circonstance quel est le temps nécessaire pour que chaque papier impressionnable donnât la même teinte; mais l'action a-t-elle lieu proportionnellement au temps? Si la combinaison du chlore et de l'hydrogène paraît se faire dans ces conditions, comme on va le voir plus loin, l'action sur les papiers impressionnables préparés avec des sels d'argent conduit à des résultats opposés, puisque l'on a vu dans les chapitres I et II que si la partie la plus réfrangible du spectre agit à peu près avec la même intensité dans les mêmes circonstances, la partie la moins réfrangible au contraire agit d'autant plus vivement que la substance a été im-

pressionnée davantage. D'un autre côté, la partie extrême du rouge peut, en agissant simultanément avec les autres parties du spectre, diminuer l'effet de celles-ci. On voit que l'on ne doit demander à cette méthode que des indications sur les effets plus ou moins énergiques produits dans un temps donné, ainsi que l'observation du maximum d'action pendant une période déterminée.

On peut citer comme se rapportant à ce sujet les expériences de M. Malaguti (1), dont on a parlé antérieurement page 102, ainsi que les dispositions nombreuses proposées depuis et fondées sur les effets de coloration des papiers impressionnables.

M. Claudet (2) a indiqué une disposition au moyen de laquelle on peut évaluer le temps nécessaire pour que la lumière donne une impression d'une intensité déterminée sur une surface sensible; il a nommé photographomètre l'appareil qu'il avait ainsi disposé.

M. Pouillet (3) a montré que l'on pouvait utiliser l'action exercée par les rayons solaires sur les papiers photographiques préparés avec des sels d'argent, pour marquer les instants de la journée auxquels le soleil se montre ou se cache et la durée de ses apparitions ou disparitions. Dans l'appareil qu'il a construit pour cet usage, il ne compare pas entre eux les effets produits sur la matière sensible, et celle-ci n'est pas influencée par la lumière diffuse; elle n'est colorée que par les rayons solaires directs qui viennent la frapper.

Il y a certaines réactions chimiques opérées sous l'influence de la lumière et qui donnent lieu, comme résultat final, à un dégagement de gaz. Telle est l'action exercée sur l'eau chlorée et celle qui peut se produire en mélangeant de l'acide oxalique avec un sel de peroxyde de fer; dans le premier cas il y a dégagement d'oxygène, et dans le second cas on observe un dégagement d'acide carbonique dû à la décomposition de l'oxalate de peroxyde de fer.

L'action de la lumière sur l'eau chlorée est un phénomène complexe en raison de ce que le chlore se porte sur l'hydrogène et sur une partie de l'oxygène de l'eau, et qu'il est difficile de tenir compte de la proportion de gaz qui peut rester en dissolution (4).

M. Draper, comme on l'a déjà dit antérieurement, page 72, a reconnu

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série., t. 72, p. 5.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 27, p. 370.

(3) *Id.*, t. 42, p. 913, 1856.

(4) Voir les mémoires de MM. Wittwer et Bunsen et Roscoe, *Ann. de Poggend.*, t. 94, p. 597, t. 96, p. 373, et t. 97, p. 304.

qu'une dissolution d'oxalate de peroxyde de fer peut être conservée dans l'obscurité sans changement; mais que dès qu'on l'expose à la lumière du jour ou d'une lampe elle se décompose avec dégagement de gaz acide carbonique et précipitation d'un sel ferrugineux; il a donc proposé cette réaction pour comparer les intensités de l'action chimique exercée par la lumière. La difficulté de l'emploi de cette méthode consiste à évaluer la proportion d'acide carbonique qui reste en dissolution dans le liquide, car celui-ci doit se saturer de gaz avant qu'aucun dégagement n'ait lieu; l'auteur a fait usage, pour cela, soit de l'élévation de température du liquide après l'insolation, soit d'un courant de gaz hydrogène.

Ces motifs ont engagé M. Draper à doser le sel de protoxyde de fer provenant de l'action lumineuse sur l'oxalade de peroxyde, au lieu d'évaluer la proportion de gaz produit : ayant remarqué que la solution mêlée à du chlorure d'or ne donne lieu à aucune réaction, mais que la plus faible trace de lumière produit une précipitation de métal, il a comparé les intensités des effets produits par la lumière diffuse à des heures et à des jours différents, par le poids de l'or précipité pendant un temps déterminé, dans un volume également déterminé.

On peut employer la réaction que j'ai indiquée page 69, et d'après laquelle au milieu d'une masse liquide formée par un mélange d'acide oxalique et de bichlorure de mercure il se produit une précipitation de protochlorure de mercure sous l'influence de la lumière. Les proportions du mélange sont pour 100 gr. d'eau, 6 gr. 5 de bichlorure de mercure et 12 gr. 5 d'acide oxalique; la dissolution est alors complète. Lorsque l'insolatino a lieu, le protochlorure de mercure se précipite et il ne reste plus de ce sel en dissolution; la seule précaution à prendre consiste à filtrer la liqueur et à peser le protochlorure.

J'ai fait quelques séries d'expériences pour connaître quelle était l'influence du temps sur la quantité d'action chimique produite : pour cela, un certain nombre de flacons semblables ont été exposés à la lumière solaire avec un même poids de la même dissolution, et l'on a laissé l'un deux minutes l'autre quatre, une autre six, etc., de façon à avoir cinq ou six flacons exposés à la fois; on a opéré également en les retirant de cinq minutes en cinq minutes ou de quart d'heure en quart d'heure. Il m'a semblé que les résultats d'une même série d'expériences pouvaient assez bien être représentés par la formule,

$$P = C\left(1 - \frac{1}{e^{at}}\right)$$

dans laquelle P est le poids du protochlorure précipité, $t$ le temps d'exposition à la lumière, C une constante représentant le poids total de protochlorure qui peut être précipité de la dissolution après un temps très-long, $e$ et $a$ deux coefficients constants.

Les expériences n'ont pas été assez nombreuses, ni faites absolument dans les mêmes conditions d'intensité lumineuse pour que je puisse affirmer cette loi ; je n'ai pu également bien mettre en évidence si la réaction, lente dans les premiers instants de l'influence lumineuse, s'accélère comme on en a des exemples et ainsi qu'il sera dit plus loin ; il aurait fallu que j'eusse opéré dans une chambre noire avec un faisceau de rayons solaires de même intensité, ce que je n'ai pu faire jusqu'ici ; c'est du reste un sujet qui mérite d'être étudié. J'ai insisté sur cette réaction, car elle se produit au milieu d'une dissolution incolore, et les rayons qui sont compris entre les réfrangibilités A et H du spectre solaire sont absorbés dans les mêmes proportions ; l'action a donc lieu principalement sous l'influence des rayons ultra-violets, puisque les rayons qui agissent sur ce liquide doivent être absorbés. J'ai constaté en effet qu'un tube plein de la dissolution sensible étant exposé au soleil au milieu d'un vase rempli du même liquide ne donnait lieu qu'à une faible précipitation, due à la portion de rayons actifs qui avait pu encore traverser le mélange sans agir sur la dissolution environnante ; une plus grande épaisseur de liquide eût produit l'effet d'un écran opaque pour la réaction chimique opérée sur cette matière.

M. Draper, en 1843, avait employé le mélange de chlore et d'hydrogène, qui détone, comme on le sait, à la lumière solaire (voir p. 51), mais qui se combine lentement à la lumière d'une lampe, pour comparer les actions chimiques produites par des rayons de diverses intensités. Cette réaction est d'une sensibilité très-grande ; mais dans les expériences qu'il fit à ce sujet il ne s'occupa pas de l'inégale solubilité des gaz dans le liquide avec lequel ils étaient en contact, et dès lors on ne peut regarder comme provenant uniquement de la combinaison des deux gaz la diminution de volume observée.

MM. Bunsen et Roscoe (1) se sont servis d'un appareil fondé sur ce principe et à l'aide duquel ils ont fait un grand nombre d'observations

(1) *Annales de Poggendorf*, t. 100, p. 43. — *Id.*, p. 481. — *Id.*, t. 101, p. 235. — *Id.*, t. 108, p. 193. *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 55, p. 352. — *Bibloth. univ. de Genève*, nouvelle période, t. 1, p. 145, et t. 7, p. 71.

très-intéressantes, dont nous allons citer les principaux résultats.

Pour se procurer un mélange formé de volumes égaux de chlore et d'hydrogène, ils se sont servis de la décomposition électro-chimique d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique, en prenant pour électrodes des conducteurs en charbon que l'on avait soin de tenir toujours immergés dans le liquide à décomposer. Suivant les analyses qu'ils ont faites, le gaz qui se dégage est formé de volumes exactement égaux de chlore et d'hydrogène, et le mélange ne contenait ni oxygène ni acide hypochloreux produits soit par la décomposition de l'eau, soit par une action secondaire du chlore (1). L'acide chlorhydrique employé avait une densité égale à 1,148. Le mélange ainsi obtenu peut être abandonné à lui-même dans l'obscurité, pendant vingt-quatre heures au moins, sans qu'il se manifeste la moindre apparence de combinaison des deux gaz.

Le mélange fourni par la décomposition électro-chimique se dégageait dans une éprouvette communiquant, par la partie supérieure, à un tube laveur que suivait un tube horizontal terminé en *r* par un robinet en verre, fig. 53.

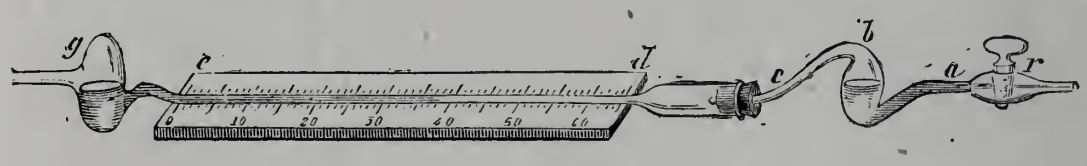



Fig. 53.

La partie essentielle de l'appareil où se faisait les mesures consiste en un tube en verre *abc*, recourbé, présentant au milieu en *b* un renflement de 7 centimètres cubes environ, à moitié plein d'eau. Le tube *abc* était suivi par un tube horizontal assez long *cde*, et communiquait à celui-ci par une partie un peu plus large *c*; le tube horizontal *d e* était fixé sur une échelle graduée et se terminait en *g* par un second renflement où se trouvait encore de l'eau; enfin, ce dernier renflement communiquait à un flacon condenseur par un tube en caoutchouc. Le mélange de chlore et d'hydrogène pouvait circuler dans les deux tubes *abc, cde;* dans le renflement *b* il pouvait être soumis à l'action de la lumière, et afin de limiter cette action au gaz

(1) Il faut sans doute que la dissolution d'acide chlorhydrique soit pure, car dans quelques expériences faites sur l'électrolyse de l'acide chlorhydrique du commerce à l'aide d'une intensité électrique très-puissante et des électrodes en platine, nous avons observé, M. Fremy et moi, la présence de composés chlorés.

sans qu'elle s'étendît à l'eau chlorée contenue dans le renflement, toute la partie du verre occupée par l'eau était enduite extérieurement de noir de fumée.

Pour faire une expérience, on laissait d'abord circuler dans l'appareil, pendant plusieurs jours, le mélange des deux gaz hydrogène et chlore, de manière à saturer complétement l'eau qui en occupait diverses parties; puis on fermait le robinet *r*, on notait la division du tube *de* où s'arrêtait la colonne d'eau provenant du renflement *g*, dont le niveau était supérieur à *de*, et on laissait agir le faisceau lumineux sur le renflement *b*, tout le reste de l'appareil étant dans l'obscurité. Lorsque l'expérience était terminée, le déplacement de la colonne d'eau dans le tube *de* faisait connaître le volume de gaz absorbé dans la partie *abcde*, et par conséquent la quantité du mélange qui sous l'influence de la lumière s'était transformé en acide chlorhydrique et s'était dissoute, après cette transformation, dans le renflement *ab*.

Pendant que l'expérience avait lieu, on n'arrêtait pas la décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique qui avait fourni le mélange gazeux, mais on la ralentissait beaucoup en introduisant dans le circuit de la pile la résistance d'une colonne d'eau à peine acidulée. Le faible dégagement de gaz qui subsistait encore servait à maintenir la saturation du liquide de l'appareil à décomposition et de l'eau du tube laveur; l'excès de gaz s'échappait d'ailleurs par un tube de sûreté soudé en un point du tube laveur et plongeant par son extrémité dans un flacon plein d'eau, à l'aide duquel on pouvait régler la pression dans l'intérieur de l'appareil et déterminer le gaz à s'échapper soit par le robinet *r* et les tubes *abcdeg*, soit par le tube de sûreté et le flacon régulateur. Enfin, un second appareil condenseur, semblable à celui dont il a été fait mention tout à l'heure, et qui servait à absorber le gaz en excès sortant de *g*, recevait le gaz après qu'il avait traversé l'eau de ce flacon.

La lumière qui a servi aux expériences était la lumière d'un bec de gaz, concentrée sur le vase ou renflement *b* au moyen d'une lentille, et dépouillée de la plus grande partie des rayons infra-rouges en traversant une couche d'eau de plusieurs centimètres d'épaisseur.

MM. Bunsen et Roscoe se sont occupés d'abord de l'étude des circonstances qui peuvent avoir de l'influence sur les phénomènes et des conditions nécessaires pour avoir des résultats toujours comparables.

En employant un bec de gaz en platine monté sur un petit réservoir cubique et placé au milieu d'une grande boîte rectangulaire, laquelle avait sa base percée d'un grand nombre de trous, le réservoir cubique rendait l'écoulement du gaz d'éclairage parfaitement régulier et la boîte faisait disparaître toutes les oscillations dues à l'agitation de l'air extérieur. Dans une des parois de la boîte était pratiquée une ouverture circulaire, fermée par une sorte de cuve cylindrique pleine d'eau, que les rayons émis par la flamme devaient traverser avant d'agir sur le mélange de chlore et d'hydrogène. Avec cet appareil, la flamme réglée à une hauteur convenable présentait une invariabilité absolue de forme, de dimensions et d'éclat, et semblait un corps solide incandescent.

On a constaté que la constance de l'intensité chimique des rayons émis par la flamme dépend moins de la composition du gaz d'éclairage qu'on aurait dû le supposer, car les analyses du gaz ont donné des résultats variables quant à la composition, alors que les effets chimiques ont été parfaitement constants. Si la flamme est mélangée d'air de façon à ce que la combustion soit complète et qu'il n'y ait plus de carbone en excès, la puissance d'action chimique de cette flamme disparaît presque entièrement ; mais la coloration de la flamme ainsi dépourvue de carbone, par les matières salines en vapeur, peut faire varier le pouvoir d'action chimique de la lumière, comme on l'a vu chapitre II, page 117.

Le degré de concentration de la dissolution aqueuse d'acide chlorhydrique qui donne le mélange gazeux actif, et le soin que l'on prend de faire circuler pendant longtemps dans l'appareil les gaz provenant de la décomposition électro-chimique de ce liquide, avant de commencer les observations, exercent la plus grande influence sur les résultats. La dissolution doit contenir environ 30 pour 100 d'acide chlorhydrique; si la proportion descend à 23 pour 100, les gaz fournis ensuite ne peuvent plus servir à des observations comparables. Si le passage du mélange gazeux est continué pendant longtemps dans l'appareil, les effets augmentent et atteignent un maximum constant; la quantité nécessaire pour arriver à ce point est environ 6 litres de gaz.

Il résulte de là qu'il est nécessaire d'employer au moins trois jours, et même plus, pour préparer l'appareil avant de commencer les expériences. Mais l'appareil ainsi préparé peut servir pendant plusieurs mois, pourvu que l'on évite avec le plus grand soin l'entrée de l'air, et qu'à chaque renouvellement de l'acide chlorhydrique que l'on décompose électro-chimiquement, on fasse dégager les gaz par le tube de sû-

reté pendant une heure ou deux avant d'ouvrir le robinet *r*, figure 53. Le mélange de gaz absolument purs que l'on obtient, en observant toutes les précautions indiquées, est d'ailleurs extrêmement sensible à l'action du rayonnement solaire, car la lumière diffuse d'un ciel nuageux ainsi que la lumière crépusculaire même longtemps après le coucher du soleil, peut suffire à en déterminer l'explosion.

Il est nécessaire que la température des gaz soit parfaitement constante, de manière que les changements de volume dus à la dilatation ne se confondent pas avec les effets de l'action chimique. Pour satisfaire à cette condition, on avait placé l'appareil dans une chambre exactement close, et, ainsi qu'on l'a déjà dit, les rayons émanés de la flamme traversaient un écran d'eau. Quand on arrête tout à coup l'action de la lumière sur le mélange gazeux, la diminution de volume qu'éprouve ce mélange persiste encore pendant quelques secondes et d'autant plus longtemps que la lumière active a été plus intense. Mais les auteurs du travail ont attribué cet effet, qui était du reste extrêmement faible, non pas à une modification permanente communiquée par la lumière au chlore ou à l'hydrogène, mais à ce que la chaleur dégagée lors de la combinaison du gaz dans l'instant qui a précédé l'observation, avait produit une dilatation, qui se traduit après par une légère contraction due au retour à l'équilibre de température avec les corps environnants. Cet effet est très-peu marqué, car il correspondait à peine à quelques dixièmes de degré.

Lors de l'action de la source lumineuse d'intensité constante pendant un temps plus ou moins long, l'observation manifeste un fait curieux, dont il faut tenir compte dans les expériences : la combinaison du chlore et de l'hydrogène, d'abord extrêmement lente, s'accélère peu à peu, quelque constante que soit la source lumineuse employée, atteint son maximum au bout de plusieurs minutes, puis, à partir de ce moment, devient sensiblement uniforme.

Ainsi, d'après MM. Bunsen et Roscoe, il y aurait une aptitude à la combinaison qui est développée par la lumière dans un mélange gazeux, et qui est telle, qu'au bout d'un temps variable, mais assez court, l'action chimique devient constante. Cette aptitude serait passagère et non permanente, car en interrompant l'action lumineuse, cet accroissement d'action disparaît, pour revenir quand on reprend de nouveau l'expérience.

Parmi les circonstances qui influent le plus sur la durée du temps

pour arriver à une action chimique constante, il faut placer la masse des gaz et l'intensité de la lumière active. La présence d'un excès de chlore ou d'hydrogène ou d'un gaz étranger retarde la combinaison de chlore et d'hydrogène produite par la lumière. Ainsi, il suffit de la présence de quelques millièmes en volume de gaz oxygène, hydrogène ou chlore, pour produire un effet marqué ; le gaz oxygène donne lieu à un retard encore bien plus grand, mais le gaz acide chlorhydrique n'exerce qu'une influence à peine appréciable.

Pour expliquer cet effet, MM. Bunsen et Roscoe ont donné le nom d'induction chimique à la tendance que deux corps possèdent à s'unir, c'est-à-dire à l'effort que font les molécules pour se combiner, et ils ont admis que cette tendance est contrebalancée par la résistance que les corps opposent à cette union. Si l'équilibre est établi, il peut ne pas y avoir combinaison ; mais la résistance peut être diminuée et par conséquent la tendance augmentée, soit par l'influence de la lumière, soit par d'autres causes, et dans le premier cas l'effet est dû à ce que les auteurs nomment l'induction photo-chimique. Si l'on suppose qu'un corps étranger vienne à se mélanger avec les corps qui manifestent ces effets, la tendance à la combinaison doit être plus ou moins diminuée.

Mais ces idées théoriques ne sauraient être admises sans de nombreuses preuves à l'appui : si l'on examine les effets produits avec d'autres matières impressionnables, on en trouve qui manifestent des actions analogues, d'autres qui ne les produisent pas. Ainsi l'iodure d'argent ou les sels d'argent avec excès de d'azotate, comme on l'a vu page 63, quand ils sont soumis à l'action de la lumière, indiquent deux genres d'action : 1° impressionnés par les rayons les plus réfrangibles, ils donnent des effets qui sont toujours les mêmes, et qui ne dépendent que de l'intensité des rayons actifs ; les effets de coloration et les phénomènes électriques qu'ils présentent le démontrent ; 2° soumis à l'action des rayons les moins réfrangibles, ils ne sont pas impressionnés s'ils n'ont été soumis préalablement à l'action de la lumière, et alors ils sont d'autant plus modifiés que l'impression préalable par les autres rayons a été plus forte. Ainsi, dans ce dernier cas les parties impressionnées du corps jouent par rapport à celles qui ne l'ont pas été le rôle du platine , de l'or en éponge par rapport à un mélange d'hydrogène et d'oxygène, et la lumière vient produire sur le sel d'argent un effet analogue à celui auquel la chaleur donne naissance

dans le cas des corps placés en présence du platine; les diverses parties du rayonnement lumineux agissent donc différemment. Si l'on examine d'autres corps, comme le sous-chlorure d'argent violet, dont on peut suivre l'altération à l'aide des courants électriques, on trouve que dans les mêmes conditions d'intensité lumineuse l'effet chimique est le même, ce qui montre que l'action n'augmente pas d'intensité à mesure que la lumière agit plus longtemps, à moins que ce phénomène ne soit produit dans un temps infiniment court, auquel cas on rentre dans la loi commune, c'est-à-dire que l'on aurait à considérer le temps qui sépare l'instant où la lumière agit, du moment où la décomposition se produit.

Il n'est pas impossible que le mélange des deux gaz chlore et hydrogène exige qu'une certaine somme de forces vives lui soit communiquée avant que la combinaison ne s'opère dans des conditions régulières; mais il faudrait s'assurer si les rayons différemment réfrangibles qui la produisent agissent tous avec la même intensité comparative, et si dans les circonstances particulières de la combinaison des deux gaz on ne trouve pas la cause de l'effet curieux qui vient d'être signalé.

Une des méthodes les plus sûres et les plus faciles à employer pour la comparaison d'effets chimiques par la lumière est celle qui consiste à se servir de l'actinomètre électro-chimique, sur les lames d'argent duquel on a formé de l'iodure ou du sous-chlorure d'argent. On représente de nouveau cet appareil fig. 51, dont il a été question antérieurement. On a vu dans le chapitre précédent, page 146, que l'on pouvait se servir de cet instrument pour reconnaître l'instant où les rayons avaient même intensité, et dès lors en faisant, varier avec une ouverture à bords mobiles, la quantité de rayons parallèles qui tombent sur une lentille, laquelle

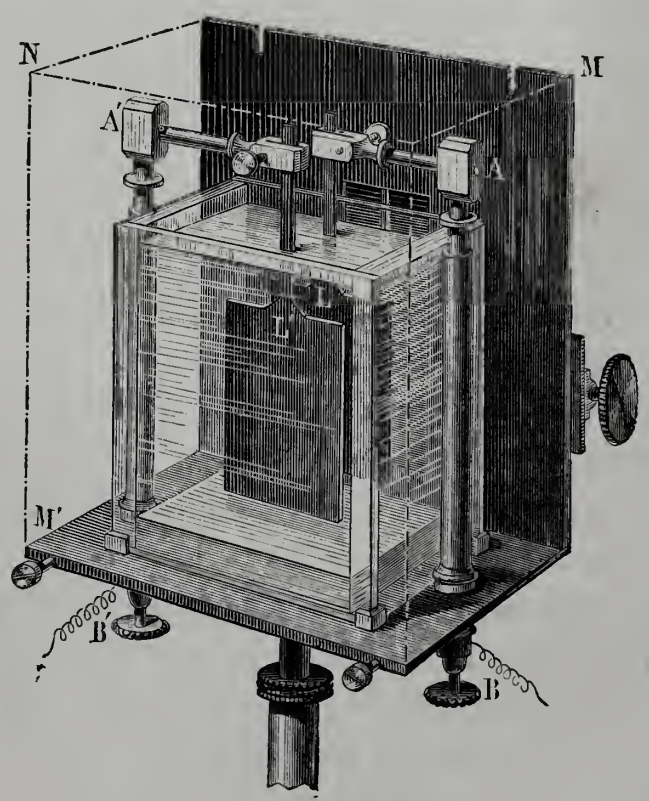


Fig. 51.

réfracte ces rayons et les fait converger sur une même étendue de surface impressionnable, on peut apprécier l'intensité relative des rayons actifs. Comme cet appareil a déjà été décrit, je ne mentionne ici que l'emploi que l'on peut en faire en suivant la marche qui vient d'être indiquée.

Il faut rappeler de nouveau ici que les mesures comparatives prises par une des méthodes qui viennent d'être indiquées peuvent ne pas être les mêmes que celles données par les autres procédés, car chaque substance est impressionnable entre des limites différentes de refrangibilité, et les observations dans chaque cas ne se rapportent qu'aux rayons qui impressionnent la matière à l'aide de laquelle ces observations sont faites.

§ 2. *Effets des différentes sources lumineuses. Soleil, lumière diffuse, lampe à gaz oxygène et hydrogène, flamme du magnésium en combustion.*

Les méthodes dont il vient d'être question ont servi à comparer les intensités chimiques de différentes sources lumineuses avec celle des rayons solaires. On a indiqué dans le chapitre II, page 82, comment MM. Bunsen et Roscoe avaient déterminé les rapports des intensités des différents rayons du spectre pour produire la combinaison du chlore et de l'hydrogène en employant la méthode qui vient d'être décrite, et l'on a vu que l'on observait deux maxima d'action, dont le plus fort était situé entre G et H, et le plus faible était placé au delà de H. Mais en déterminant l'intensité de l'action chimique relative des différents rayons pour les diverses heures du jour, ils ont trouvé que l'absorption, qui pour chacun d'eux augmente avec l'épaisseur atmosphérique traversée, n'est pas la même pour tous. L'étude complète de cette question nécessiterait des expériences faites aux différentes heures du jour et à diverses époques de l'année.

On a vu, d'un autre côté, dans le chapitre précédent, page 137, que l'actinomètre électro-chimique pouvait servir pour la comparaison des effets des différentes parties du spectre, et quels sont les résultats qui ont été obtenus à l'aide des chlorures et iodures d'argent impressionnés par la lumière solaire ou par celle d'une lampe.

MM. Bunsen et Roscoe, comme il a été dit plus haut, ont évalué en fonctions de l'acide chlorhydrique produit la quantité d'action chimique exercée par la lumière, et ils ont même exprimé cette action en indi-

quant l'épaisseur d'acide chlorhydrique qui se formerait à 0° et $0^m,76$ de pression, si la lumière considérée avait pénétré dans un milieu indéfini qui serait constitué par le mélange de chlore et d'hydrogène à volumes égaux (1).

Ils ont successivement examiné l'action de la lumière diffuse et de la lumière solaire. Pour la lumière diffuse, ils ont étudié l'influence d'une portion restreinte du ciel prise au zénith, puis plus près de l'horizon, et cela à des distances zénithales différentes du soleil; après avoir formé une table pour toutes ces hauteurs, ils ont évalué l'action de la voûte céleste sur une surface donnée et pendant un temps déterminé, et ils ont pu en déduire l'action chimique de la lumière atmosphérique pour diverses heures du jour et dans un lieu d'une latitude donnée.

Passant ensuite à l'action directe du rayonnement solaire, ils ont fait agir un faisceau de rayons introduit dans une chambre obscure sur le mélange gazeux de chlore et d'hydrogène; en opérant à des hauteurs du soleil différentes, ils ont évalué l'influence absorbante de l'atmosphère sur les rayons qui avaient ainsi traversé des couches d'air d'épaisseur variable. Ils ont donc suivi une méthode analogue à celle dont M. Pouillet avait fait usage pour étudier l'action calorifique solaire, et ont pu en déduire la quantité d'action chimique qui serait exercée par le soleil à la limite de notre atmosphère sur le mélange de chlore et d'hydrogène.

Le calcul, appliqué à leurs observations, a montré que si les rayons solaires ne subissaient aucune absorption atmosphérique en tombant verticalement sur la terre dans une atmosphère indéfinie de chlore et d'hydrogène, ils provoqueraient pendant chaque minute la formation d'une couche d'acide chlorhydrique d'une épaisseur d'environ 35 mètres. Après avoir traversé l'atmosphère, ces rayons n'auraient plus qu'une force représentée par 14 mètres et demi, c'est-à-dire qu'ils auraient perdu environ les $\frac{2}{3}$ de leur intensité primitive.

Les recherches sur le rayonnement solaire ont montré, comme on l'a vu dans le livre Ier, page 43, de ce volume, que dans les mêmes conditions l'action calorifique est au plus diminuée de $\frac{1}{3}$ de sa valeur. Ainsi, les rayons les plus réfrangibles de la lumière qui produisent la combinaison du chlore et de l'hydrogène sont absorbés en plus grande pro-

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 108 (1859). — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 7, p. 71.

portion par l'atmosphère que les rayons les moins réfrangibles. On ne peut représenter par une loi simple les effets produits, car cette absorption se fait sentir inégalement sur les divers rayons, comme on en a la preuve dans la production des raies ou bandes si nombreuses de la partie violette et ultra-violette du spectre.

D'après les nombres précédents, on voit que l'action chimique qui serait développée pourrait être représentée, en équivalent, par une quantité de chaleur très-considérable ; mais cela n'indiquerait rien quant à la puissance dynamique des rayons, car dans cette réaction le faisceau lumineux peut ne servir que de cause déterminante de la combinaison, et celle-ci pourrait s'opérer sans l'intervention immédiate de la lumière. Dès lors les nombres de calories que l'on déduirait de ce calcul ne seraient pas en rapport avec l'énergie seule des rayons solaires.

MM. Bunsen et Roscoe ont étudié, à l'aide du mélange de chlore et d'hydrogène, l'action de la lumière diffuse atmosphérique comme ils l'avaient fait pour la lumière directe. Ils ont reconnu que suivant les hauteurs du soleil l'action provenant de toute la lumière diffuse peut être égale et même supérieure à celui des rayons solaires directs ; ils ont même été conduits à cette conséquence, vérifiée par expérience, que pour les latitudes basses il y a toujours deux instants pendant la journée, l'un avant, l'autre après midi, où les deux actions sont égales. A l'époque où ils ont opéré à Heidelberg, le 21 février 1859, le calcul a donné $9^h 7'$ le matin et $2^h 53'$ après midi, et l'expérience leur a indiqué, pour le second instant, un intervalle compris entre $3^h 1'$ et $3^h 16'$.

Voici, d'après leur détermination, les intensités totales solaires et atmosphériques dans un certain nombre de localités variant de latitude depuis 15° du pôle (île Melville) jusqu'à 30° de l'équateur (le Caire), évaluées en épaisseur d'acide chlorhydrique formé, si les rayons pénétraient dans une atmosphère indéfinie de chlore et d'hydrogène. Les résultats suivants expriment l'action pendant l'intervalle de temps qui s'écoule entre le lever et le coucher du soleil, le jour de l'équinoxe :

| | Latitude. | Épaisseur d'acide chlorhydrique. |
|---|---|---|
| Ile Melville | 74°47' | 1306 |
| Reykjawik | 64° 8' | 2321 |
| Saint-Pétersbourg | 59°56' | 2806 |
| Heidelberg | 49°26' | 4136 |
| Naples | 40°51' | 5226 |
| Le Caire | 30° 2' | 6437 |

Les différences entre les effets qui seraient produits dans ces divers pays sont moins considérables qu'on aurait pu le penser, et la cause en est dans la puissante dissémination lumineuse produite par l'atmosphère; en effet, l'action photo-chimique directe du soleil (action mesurée par la combinaison gazeuse chlore et hydrogène) varie comme 1 : 15 : 30 entre l'île Melville, Heidelberg et le Caire, tandis que l'effet de la diffusion atmosphérique varie seulement comme 9 : 16 : 18.

Les recherches de MM. Roscoe et Baxendell (1) démontrent combien l'absorption des rayons actifs très-réfrangibles augmente rapidement avec l'épaisseur de l'atmosphère; ainsi, lorsque le soleil avait une hauteur moyenne de 25° 16′ sur l'horizon, le rapport des intensités chimiques de la lumière directe et de la lumière diffuse sur un papier sensible préparé avec un sel d'argent étant 0,23, celui des intensités lumineuses était 4, c'est-à-dire que l'action de l'atmosphère était 17 fois plus grande sur les rayons impressionnant chimiquement les composés d'argent que sur les rayons agissant sur la rétine. Lorsque cette hauteur du soleil sur l'horizon n'a plus été que moitié, 12° environ, le rapport moyen des intensités chimiques de la lumière directe et de la lumière diffuse n'a plu été que de 0,053 et celui des intensités des rayons lumineux que de 1,4, c'est-à-dire alors que l'action de l'atmosphère s'est trouvée 26 fois plus grande sur les rayons actifs sur le papier impressionnable que sur les rayons lumineux. A des hauteurs moindres, l'action chimique directe du soleil devint inappréciable, tandis que l'intensité des rayons visibles était encore assez grande; les rayons les plus réfrangibles manquaient donc, ce qui est indiqué par la couleur rouge du disque solaire près de l'horizon.

M. Roscoe (2) a appliqué à la détermination de l'intensité chimique des différentes parties du soleil la méthode décrite plus haut, et relative à l'emploi du mélange de chlore et d'hydrogène; il a observé que le centre du disque solaire exerce une action chimique plus intense que les bords. On serait donc conduit à une conséquence analogue à celle que le père Secchi avait déduite de ses observations, et d'après lesquelles le rayonnement calorifique du centre du disque solaire serait plus intense que celui des bords.

MM. Bunsen et Roscoe ont comparé l'action exercée par le soleil sur

(1) Procès-verbaux de la Société royale de Londres, fév. 1866. *Biblioth. univ. de Genève,* nouvelle série, t. 27, p. 260.

(2) *Annales de Poggend.*, t. 120, p. 131.

le mélange de chlore et d'hydrogène avec celle d'une source lumineuse terrestre, et ils ont employé la lumière provenant de la combustion d'un fil de magnésium. En se basant sur les lois connues relativement à l'influence de l'éloignement plus ou moins grand d'une source lumineuse eu égard à sa surface, ils ont trouvé que la surface d'une masse de magnésium en combustion dans l'air, vue sous une grandeur apparente égale à celle sous laquelle nous voyons le soleil, produit la même action chimique sur le mélange gazeux que lorsque cet astre se trouve à 9° 53′ au-dessus de l'horizon; c'est-à-dire que si un disque de magnésium en combustion de 1 mètre de diamètre était placé à 107 mètres, il produirait la même action sur le mélange de chlore et d'hydrogène que le soleil à cette hauteur de 9° 53′.

Quant au rapport des effets optiques de ces deux sources de lumière, il est tel que si le soleil est à 67° 22′ de distance zénithale, il a une intensité lumineuse 525 fois plus forte que celle du fil de magnésium de $0^{mm},97$ de rayon qui brûle dans l'air, tandis que le rapport des intensités chimiques sur le mélange de chlore et d'hydrogène est seulement 37. On voit que la combustion du magnésium donne une source lumineuse contenant en abondance des rayons très-réfrangibles.

MM. Fizeau et Foucault (1) ont comparé les intensités lumineuses de la lumière solaire vers midi, par un ciel pur, avec celle de l'arc voltaïque formé au moyen de couples à acide azotique de petites dimensions et d'un nombre variable de 46 à 80, ainsi qu'avec celle de la flamme d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène portant à l'incandescence un fragment de chaux; puis ils ont examiné simultanément l'action chimique produite sur des plaques daguerriennes, en cherchant le temps correspondant à l'image naissante sur une plaque placée au foyer de la lentille d'une chambre photographique donnant l'image de la source. Pour obtenir ce temps, ils ont déplacé la chambre noire afin d'avoir sur la même plaque une série d'images dans des temps plus ou moins longs.

Avec la lumière de la chaux incandescente et celle de l'arc voltaïque obtenue au moyen de 46 couples, les rapports des intensités lumineuses et chimiques ont été sensiblement les mêmes; ce rapport a été de 1 : 34,3. Ainsi, l'arc voltaïque formé avec les 46 couples a exercé une action chimique 34 fois plus forte, en même temps que le photomètre

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 11, p. 370, 1844.

a donné les mêmes indications comparatives. L'irradiation par incandescence de la chaux et du charbon n'a donc pas présenté une beaucoup plus grande proportion de rayons très-réfrangibles.

La lumière solaire directe ayant été comparée à l'arc voltaïque, ils ont trouvé le rapport de 1,000 à 238 ou 240, c'est-à-dire que le soleil a produit sur les plaques daguerriennes une action chimique 4 fois plus énergique que la lumière de la pile composée de 46 petits éléments. Avec 46 grands éléments, le nombre a été porté à 385 et le rapport des intensités d'action chimique s'est élevé à 1,000 : 235, c'est-à-dire que le soleil n'a plus été que deux fois et demie plus fort; des couples voltaïques plus grands encore eussent peut-être donné un arc dont l'action se serait rapprochée encore davantage de celle de la lumière solaire. On voit, d'après cela, qu'avec ces deux sources les intensités des actions chimiques et lumineuses ne sont pas proportionnelles, et que le soleil contient des éléments très-réfrangibles en plus grand nombre que l'arc voltaïque formé entre des électrodes en charbon.

En employant d'autres sources lumineuses et en examinant les effets produits sur diverses substances impressionnables, on pourrait trouver des nombres bien différents, car, ainsi qu'on l'a déjà dit au commencement de ce chapitre, page 147, les substances impressionnables sont affectées par des rayons de réfrangibilité différente, et telles substances seraient proportionnellement plus influencées par la lumière de la chaux incandescente, à égalité d'intensité lumineuse, tandis que d'autres le sont plus vivement par la lumière du magnésium en ignition. Mais comme dans beaucoup de cas, et surtout pour les sels d'argent sensibles, cette dernière source est fort active, on peut l'utiliser, dans certaines circonstances, pour les besoins de la photographie.

### § 3. *Extinction des rayons actifs.*

Lorsque la lumière agit sur les corps, par ce fait même il y a diminution dans l'intensité des rayons réfléchis et transmis, et cette diminution est d'autant plus grande que la quantité d'action chimique a été plus considérable; si même toute la lumière avait été employée à produire l'action chimique, elle serait absorbée en totalité.

Pour démontrer cette proposition, on doit se servir de la réaction chimique produite sur le même composé impressionnable que celui

que l'on vient de faire traverser par le faisceau lumineux, sans quoi en faisant usage d'une autre substance sensible, on pourrait trouver que des rayons inactifs sur la première agiraient sur la seconde. En préparant, par exemple, une dissolution de peroxalate de fer, qui est jaune foncée, et en la plaçant dans un écran à faces parallèles de façon à ce qu'elle soit traversée par un faisceau de rayons solaires, ces rayons, après leur sortie du liquide, ne donnent plus lieu à la décomposition d'une dissolution semblable.

Le mélange de chlore et d'hydrogène conduit à la même conclusion : MM. Bunsen et Roscoe ont cherché quelle pouvait être l'action absorbante du gaz hydrogène et du chlore, pris isolément, sur un faisceau de rayons lumineux émanés de la flamme du gaz, en analysant ce faisceau à l'aide de l'appareil ci-dessus mentionné. Celle de l'hydrogène est sensiblement nulle dans les conditions de l'expérience; mais celle du chlore, placé dans un écran à faces parallèles, a pu être déterminée à l'aide de la combinaison des deux gaz hydrogène et chlore. On a alors substitué au chlore le mélange des deux gaz, et l'absorption a été plus grande que celle qui correspondait à la moitié du chlore, c'est-à-dire à la proportion dans laquelle ce gaz entrait dans le mélange.

Dans ces circonstances, comme dans d'autres semblables, les milieux impressionnables sont en général colorés, et cette coloration est d'autant plus grande que les rayons actifs sont moins réfrangibles. Cela résulte de ce que ces rayons étant absorbés, les corps doivent paraître de la couleur des rayons qui ne sont pas sensiblement éteints, c'est-à-dire de la couleur complémentaire de celle de la partie du spectre qui impressionne ces corps. Il se produit donc le même effet que celui qui a été signalé relativement aux couleurs végétales impressionnables dans le chapitre II, page 100, et d'après lequel, dans la plupart des cas, les parties les plus actives de l'image prismatique ont une couleur complémentaire de la couleur propre des substances.

Il résulte de là que les corps blancs, sensibles à la lumière, doivent être en général impressionnés par les rayons les plus réfrangibles ou ultra-violets; tel est le cas du chlorure d'argent précipité et de la résine de gaïac. Parmi les substances sensibles blanches et transparentes, on peut citer la dissolution contenant du bi-chlorure de mercure et de l'acide oxalique, dont on a parlé précédemment, dissolution qui donne lieu, à la lumière, à une précipitation de proto-chlorure de mercure. Si, comme on l'a déjà dit antérieurement, page 151, on place dans un vase

un peu grand une certaine quantité de cette dissolution, et qu'on enferme une petite quantité du même liquide dans un tube fermé que l'on plonge au milieu du premier vase, en exposant le tout aux rayons solaires, alors qu'au bout de peu d'instants on a un précipité abondant dans le liquide du grand vase, celui de l'éprouvette ne donne qu'un dépôt très-faible. Dans ce cas, les rayons actifs ayant exercé leur action sur le liquide extérieur dont l'épaisseur autour du tube était de 5 à 6 centimètres, se sont trouvés éteints en partie.

Quand on examine l'action chimique exercée par la lumière sur un corps impressionnable, après son passage à travers une autre substance sensible, on pourrait, comme on l'a dit plus haut, arriver à une autre conclusion, car les rayons actifs sur les deux corps pourraient ne pas avoir la même réfrangibilité. Ainsi, des rayons jaunes qui auraient traversé le mélange de chlore et d'hydrogène pourraient ne plus agir sur ce mélange, mais exercer une influence sur le sous-chlorure d'argent, qui est impressionnable sous l'action des rayons les moins réfrangibles.

Cependant, si les matières différentes sont impressionnées par les mêmes parties du spectre, on observe des effets analogues à ceux cités plus haut, même quand les substances qui reçoivent l'impression lumineuse sont des substances phosphorescentes, c'est-à-dire lorsque les rayons sont éteints par une autre action moléculaire que par des réactions chimiques. Tel est l'effet que j'ai observé, comme je l'ai déjà rapporté dans le 1er volume page 400, en recevant dans une chambre obscure, disposée pour les images photographiques et au foyer de l'objectif, l'image d'un spectre solaire projetée sur différents corps impressionnables. Si ces images photographiques sont reçues au moyen de l'objectif de la chambre noire sur des plaques daguerriennes, on reconnaît que lorsque le spectre solaire frappe une surface enduite d'une matière phosphorescente très-impressionnable, la portion du spectre où la phosphorescence a lieu ne donne par diffusion, sur l'épreuve photographique, qu'une impression plus faible que la même surface qui n'est pas recouverte de matière phosphorescente, preuve d'une diminution dans la quantité de rayons diffusés et par conséquent de l'extinction d'une partie de la lumière incidente.

Je rappellerai comme autre exemple d'un phénomène semblable, et ainsi que cela a été dit antérieurement, page 106, que la dissolution de bisulfate de quinine arrête tous les rayons situés au delà des raies H de

l'extrême violet, et que sous un tel écran la coloration de la résine de gaïac, comme les autres réactions chimiques qui ont lieu habituellement dans cette partie du spectre, ne se produisent plus. Cet effet provient de l'action de phosphorescence auquel donne lieu la dissolution, et qui fait que tous les rayons actifs d'une réfrangibilité plus grande que H sont éteints.

# LIVRE III.

## PHOTOGRAPHIE.

## CHAPITRE PREMIER.

### Daguerréotype.

§ 1. *Découvertes de Nicéphore Niepce et de Daguerre. Méthodes d'opération.*

A la fin du siècle dernier, comme on l'a vu dans les chapitres précédents, on connaissait quelques-uns des effets chimiques que la lumière peut produire, et entre autres la coloration que prennent plusieurs composés d'argent; aussi ne doit-on pas s'étonner que des physiciens et des artistes aient songé à en faire usage pour tracer, par l'action de la lumière, les dessins qu'ils voulaient représenter. Alors Charles se servait dans ses cours d'un papier enduit probablement d'un sel d'argent pour engendrer des silhouettes à l'aide de l'action lumineuse, et Wedgewood, en 1802 (1), se proposait de copier des peintures de vitraux d'église, ou des gravures, à l'aide d'enduits d'azotate ou de chlorure d'argent sur du papier ou de la peau ; quant aux images de la chambre noire, c'est-à-dire aux images vues dans cet appareil que Jean-Baptiste Porta avait découvert il y a trois siècles (2), Wedgewood les trouvait trop faibles

(1) *Journal de l'Institution royale de la Grande-Bretagne,* juin 1802.

(2) *Magiæ naturalis libri quatuor, sive de miraculis rerum naturalium*, par Jean-Baptiste Porta. La première édition en 4 livres a été publiée à Naples, en 1558; dans le chapitre 2, à la page 135, se trouve la description des effets de la chambre noire, qui était alors formée au moyen d'une ouverture faite à un volet, et en introduisant la lumière dans la chambre à l'aide d'un miroir concave.

Une autre édition publiée à Naples trente ans après (1588) est en 20 livres; la description de la chambre noire se trouve au chap. 17, p. 266, et Porta indique comment, en plaçant une lentille devant l'ouverture de cette chambre, les objets sont vus avec plus de netteté. « ....Si chrystallinam lentem foramini appones, jamjam clariora cernes... »

*

pour produire de l'effet sur l'azotate d'argent dans un temps qui ne fût pas trop prolongé. A peu près à la même époque, H. Davy parvenait à copier, sur des surfaces enduites de sels d'argent, de petits objets vus au microscope solaire; mais aucun expérimentateur n'avait rendu la surface inactive après l'influence lumineuse, de façon à conserver les empreintes formées.

Vers 1814, Nicéphore Niepce (1) était retiré aux environs de Châlons-sur-Saône, et cherchait à fixer les images de la chambre noire; mais la substance impressionnable qu'il employait, le bitume de Judée, étant très-peu impressionnable, il porta particulièrement son attention sur l'application que l'on pouvait en faire à la reproduction photographique des gravures; il découvrit que le bitume de Judée exposé à la lumière devient presque insoluble dans l'huile de naphte, alors que celui qui n'est pas impressionné est soluble, de sorte que la surface d'une plaque métallique peut recevoir un dessin formé de parties résineuses et être partiellement attaquée par des acides; ainsi il pouvait produire un dessin à la surface d'une plaque, lequel était ensuite inaltérable à la lumière. En 1827 il présenta un mémoire sur ses travaux photographiques à la Société royale de Londres. Ayant appris que Daguerre s'occupait du même sujet que celui qu'il traitait, il forma avec lui, en 1829, un acte d'association pour l'exploitation en commun de leurs méthodes photographiques.

Daguerre perfectionna d'abord les méthodes découvertes par Nicéphore Niepce, mais bientôt il leur en substitua d'autres, qui lui étaient entièrement propres; en effet, en 1831 (2), en voulant noircir les fonds des lames de plaqué d'argent sur lesquelles étaient obtenus les dessins au bitume de Judée, il exposa les parties découvertes de ces lames à l'action de la vapeur d'iode, et reconnut l'extrême sensibilité à l'influence de la lumière de l'iodure d'argent formé à la surface de l'argent métallique. En 1835, après bien des essais, il découvrit la propriété remarquable que possèdent les parties impressionnées de la couche d'iodure d'argent de fixer les vapeurs et en particulier la vapeur de mercure; il venait d'atteindre

(1) J'ai suivi ici l'*Exposition de la méthode de Daguerre*, par Arago, qui se trouve dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, t. 9, p. 250, 19 août 1839. Depuis, on a publié bien des documents sur la découverte de la photographie; on peut consulter notamment un ouvrage que vient de faire paraître M. V. Fouque, et qui a pour titre « la *Vérité* sur l'invention de la photographie; histoire de Nicéphore Niepce. »

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 9, p. 424.

le but si longtemps désiré, la fixation des images de la chambre noire. Daguerre perfectionna d'abord sa découverte, qui ne fut publiée que quatre ans après, en 1839, et qui fut l'objet d'une récompense nationale.

Depuis cette époque on sait combien de recherches cette découverte a fait naître et quels sont les nombreux changements qu'ont subis les procédés à l'aide desquels on obtient les images de la chambre noire, à tel point que dans les méthodes photographiques actuelles on ne retrouve presque rien du procédé primitif de Daguerre. Des recherches dans le but de fixer les images de la chambre noire ont peut-être été faites en même temps que celles de Daguerre; mais c'est lui qui fit connaître la réaction si curieuse au moyen de laquelle une action chimique commencée par la lumière sur l'iodure d'argent et non encore apparente, peut être rendue appréciable par une action ultérieure, par l'action de la vapeur de mercure (voir page 75), et la découverte de cette réaction a précédé l'observation des effets de continuation de réduction des sels d'argent au moyen de certains réactifs, c'est-à-dire a conduit aux méthodes photographiques actuellement usitées.

Bien que l'on n'emploie aujourd'hui le procédé de Daguerre que dans des circonstances spéciales ou pour des recherches scientifiques, comme on l'a vu précédemment, cependant ce procédé, avec les additions qu'il a reçues, pouvant être considéré comme une méthode photographique complète, il est intéressant d'en exposer succinctement les principes.

On peut diviser l'opération en six manipulations distinctes, qui sont :

1° Le décapage et le polissage de la lame de plaqué d'argent,

2° La formation de la couche sensible,

3° L'exposition à la chambre noire,

4° L'exposition de la lame à la vapeur mercurielle,

5° Le lavage de la lame à l'hyposulfite de soude,

6° La fixation et le virage du dessin au moyen d'un sel d'or.

Les cinq premières manipulations étaient connues de Daguerre; la sixième a été ajoutée depuis.

*Décapage et polissage.* — La surface de la lame de plaqué doit être parfaitement décapée et bien polie, sans quoi des taches ou des raies pourraient se trouver dans le dessin. On place la lame de plaqué dont l'épaisseur d'argent est $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{30}$ de mill. peu importe, après en avoir abattu les bords, sur un support fixé à une table comme le représente

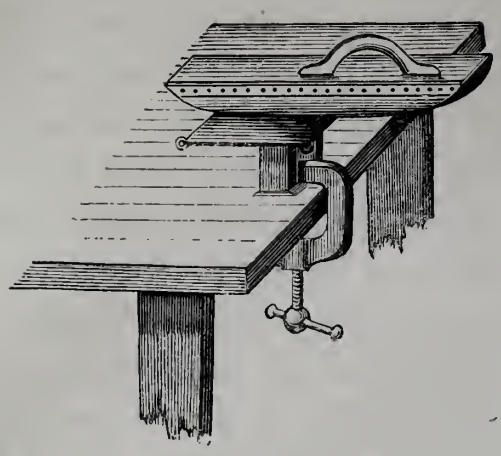


Fig. 54.

la figure 54, et on la décape avec du tripoli humecté d'essence de lavande au moyen d'un tampon de coton. Après avoir nettoyé ainsi cette lame, on passe encore sur sa surface un tampon de coton humecté d'alcool, et quand elle est sèche, à l'aide d'un polissoir en peau et du rouge d'Angleterre, on lui donne le poli nécessaire pour la netteté de la formation de l'image.

*Formation de la couche sensible.* — L'iodure d'argent impressionnable s'obtient simplement en exposant la lame de plaqué à l'influence de la vapeur d'iode. Pour régulariser l'action, on répand l'iode au fond d'une cuvette en porcelaine placée d'un côté d'une boîte divisée en deux compartiments et représentée ci-contre, figure 55 ; l'autre côté contient une seconde cuvette, dont l'usage va être indiqué plus loin. A la surface de chaque cuvette glisse un verre dépoli faisant tiroir. La partie supérieure de la boîte est munie d'une rainure dans laquelle glisse un cadre qui reçoit la plaque d'argent, et que l'on peut amener successivement au-dessus de chaque cuvette de façon à la soumettre à l'influence des vapeurs qui en émanent. Si l'une des cuvettes contient de l'iode sur toute sa partie inférieure, la vaporisation de l'iode ayant lieu à la température ambiante, il se forme de l'iodure d'argent à la surface de la lame. Quelquefois, au lieu d'iode, on place un mélange d'iode et de magnésie dans la cuvette afin de disséminer davantage cette substance volatile.

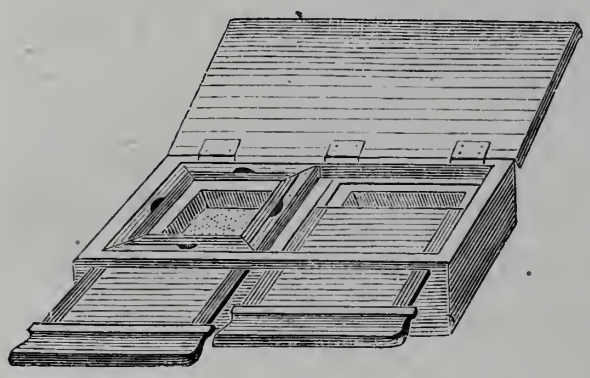


Fig. 55.

La durée de l'exposition de la lame d'argent à la vapeur d'iode dépend de la température extérieure, et peut varier de 2 à 3 minutes ; il faut s'arrêter quand la couche devient jaune d'or. Lorsqu'on ne connaît pas exactement le temps d'exposition pour atteindre cette épaisseur, bien que l'opération doive se faire à l'abri de la lumière et qu'il ne faille pas exposer la lame à l'influence de la lumière diffuse, on soulève un peu la lame et on la regarde pendant un temps très-court à l'aide

d'une faible lumière, en examinant, par réflexion sur sa surface, l'image d'un papier blanc ; la teinte jaune d'or est alors facile à apprécier.

Telle était la préparation de la lame sensible par Daguerre; quand il exposait cette lame à la chambre noire, il fallait, même au soleil, 10 à 15 minutes d'exposition pour obtenir une épreuve. M. Claudet (1) remarqua qu'en exposant la lame ainsi iodurée au chlore ou à la vapeur de chlorure d'iode, on la rendait beaucoup plus impressionnable, et M. Fizeau (2) indiqua le brome comme donnant une sensibilité encore plus grande. Actuellement on opère comme il suit :

On place dans la seconde cuvette de la boîte à compartiment de l'eau bromée, ou mieux de la chaux éteinte qui a absorbé du brome, et qui émet lentement cette substance. Quand la plaque est iodée, on fait glisser le cadre sur le rebord de la boîte ; on l'amène au-dessus de la cuvette à brome, et on tire le verre dépoli qui s'opposait à l'action de la vapeur. Le temps de l'exposition doit être de 15 à 20 secondes ou même 30 secondes suivant la température extérieure. On ramène alors la plaque au-dessus de l'iode, et l'on fait un second iodage pendant un temps assez court, qui doit être du tiers au quart du temps pendant lequel la vapeur de brome a agi; par conséquent, cette durée doit être de 8 à 10 secondes.

Ce second iodage est nécessaire pour éviter que les images à la chambre noire ne soient voilées, ce qui arrive souvent sans cette préparation. Dans cet état, la plaque est environ 60 fois plus sensible qu'avant l'action du brome, et dans les conditions où la surface simplement iodée aurait nécessité une action pendant 15 minutes pour donner une image, la lame iodée et bromée peut la donner en 15 secondes.

On a déjà parlé antérieurement, page 90, de l'augmentation de sensibilité que présente l'iodure d'argent dans cette circonstance; mais on n'en connaît pas la cause, et l'on ne sait pour quel motif un mélange d'iodure et de chlorure d'argent, ou d'iodure et de bromure, est plus impressionnable que chacune des deux substances prises isolément.

Cette préparation doit être faite à l'obscurité ; quand la plaque a été exposée à l'influence du brome, il est nécessaire que la moindre trace de lumière diffuse ne vienne pas l'impressionner. Comme on a vu dans le livre II, page 90 et suivantes, que les rayons les moins réfran-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 12, p. 1059.
(2) Id., t. 23, p. 89.

gibles n'agissent pas pour commencer une action sur l'iodure d'argent, et influencent peu l'iodure mélangé de bromure, souvent on est dans l'habitude de mettre des verres jaunes ou rouges aux cabinets dans lesquels on fait ces préparations, ou de les éclairer à l'intérieur à l'aide de lampes entourées de verre de cette couleur. Quand il s'agit de plaques bromurées, les rayons jaunes pourraient encore agir, quoique faiblement, et il est préférable de n'avoir qu'une lumière de faible intensité, ou mieux une lumière orangée ou rouge.

*Exposition à la chambre noire.* — La plaque une fois préparée est transportée dans la chambre noire où elle doit recevoir l'impression des rayons qui viennent former l'image que l'on veut reproduire photographiquement. A cet effet, la plaque est placée dans un châssis en bois représenté fig. 56, lequel est fermé par une planchette s'appliquant sur le verso et appuyant cette plaque contre des traverses fixes; elle peut donc être substituée, à un moment donné, à la glace dépolie de la chambre noire. Une seconde planchette ferme le châssis à la partie antérieure, et peut être tirée à volonté, de sorte que la plaque peut être exposée ou soustraite à l'influence de la lumière.

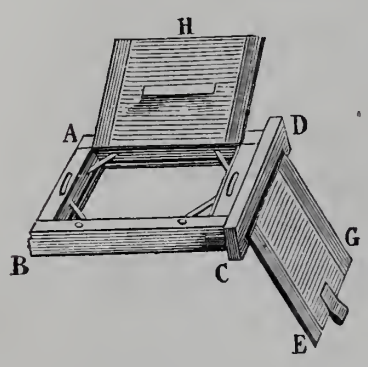


Fig. 56.

La chambre noire avait déjà été perfectionnée par Daguerre ; mais, depuis, la construction des objectifs a été le sujet de recherches importantes, et notamment la disposition des objectifs doubles destinés à la reproduction des portraits et de la nature vivante. Je n'ai pas l'intention de décrire ici les appareils en usage, et je renverrai pour cela aux divers traités de photographie publiés dans ces dernières années, mon but étant de parler seulement de l'action de la lumière et des diverses réactions chimiques que cet agent peut produire et qui ont pu être utilisées.

La durée de l'exposition de la plaque à la chambre noire est très-variable, et dépend de l'ouverture de l'écran placé en avant du diaphragme, de la distance focale de l'objectif et de l'intensité lumineuse de l'objet à reproduire ; on peut avoir une impression suffisante en une seconde ou bien quelquefois il faut deux ou trois minutes.

*Exposition de la plaque à la vapeur mercurielle.* — Si l'on voulait attendre que la couche impressionnable placée au foyer de la chambre noire donnât immédiatement, par un changement de coloration, l'indication d'un changement chimique dû à l'action de la lumière, et qu'il y

eût par conséquent une image sur la surface, il faudrait peut-être plusieurs heures ; dans ces conditions, l'image serait négative, c'est-à-dire que les parties éclairées de chaque objet seraient représentées par des ombres sur la couche sensible, et vice versa. Mais si avant que cette image apparaisse, et alors que l'impression à la lumière n'a été que de faible durée, on vient à exposer la plaque sensible à la vapeur de mercure, comme on l'a déjà dit, page 75, la vapeur de mercure ne se fixe que sur les points qui ont été frappés par la lumière, et donne une image positive des objets dont les dessins se peignaient sur la glace de la chambre noire. Telle est réaction curieuse qui est la partie essentielle de la découverte de Daguerre ; nous examinerons plus loin quel est l'effet qui peut être produit dans cette circonstance.

Pour exposer la lame à l'influence de la vapeur de mercure, on se sert d'une boîte en bois de forme parallélipipède représentée fig. 57, dont le fond est en fer. Une lampe à alcool est destinée à chauffer ce fond métallique, qui est légèrement concave, et qui peut contenir quelques grammes de mercure. Un thermomètre a son réservoir plongeant dans le mercure à l'intérieur de la boîte, et sa tige ressort à l'extérieur de façon à indiquer à l'opérateur la température du bain mercuriel. La plaque impressionnée qui vient d'être retirée de la chambre obscure est placée, dans l'intérieur de la boîte, sur des coulisses inclinées à 45° d'arrière en avant, de sorte que si à l'aide d'un volet fixé à la partie antérieure de la boîte à mercure, l'opérateur veut regarder la plaque, il la voit pendant qu'elle reçoit l'action de la vapeur de mercure.

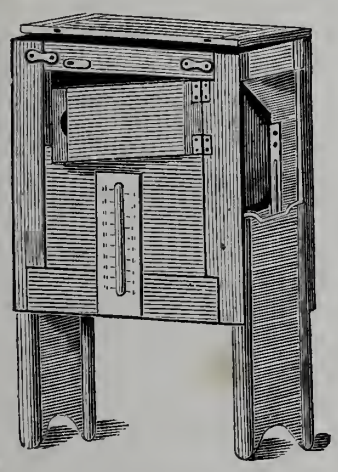


Fig. 57.

On chauffe le mercure jusqu'à 40 ou 50° ; en tout cas il ne faut pas dépasser 60° ; l'opération doit être conduite avec lenteur, et doit durer quelques minutes. Comme la lumière diffuse active ne doit pas agir sur la lame, on fixe d'un côté de la boîte une petite lame de verre jaune, et l'opérateur, en éclairant la plaque sensible de côté avec une bougie, ne fait tomber que de la lumière jaune inactive sur la plaque et peut suivre l'apparition de l'image. La boîte à mercure doit être placée dans une chambre ou dans un cabinet obscur, lequel ne serait éclairé qu'au moyen de verres rouges ou orangés, comme on l'a dit plus haut.

*Lavage à l'hyposulfite de soude.* — L'image une fois formée sur la surface sensible n'est pas inaltérable à la lumière : exposée à l'influence de la lumière diffuse ou solaire, elle disparaîtrait, par suite de la coloration de l'iodure d'argent qui recouvre toute la surface. On enlève aisément cette dernière substance en plongeant la lame dans un des dissolvants de l'iodure ; celui qui a été indiqué par Daguerre, et qui réussit le mieux, est une dissolution aqueuse d'hyposulfite de soude. On la forme en dissolvant de 10 à 20 grammes d'hyposulfite dans 100 gr. d'eau ; en plongeant dans ce liquide la lame de plaqué après sa sortie de la chambre noire, elle perd, par dissolution, les sels d'argent non impressionnés, et il reste à sa surface le dessin formé par un amalgame de mercure et d'argent représentant les parties claires de l'image par rapport au fond bruni de la plaque, qui donne les ombres. On lave alors la plaque à l'eau distillée ; on la sèche à l'aide d'une lampe à alcool, et cette manipulation se trouve terminée.

*Fixation et virage du dessin.* — Tel était, sauf l'addition des substances accélératrices, le procédé indiqué par Daguerre ; l'épreuve est alors rendue inaltérable par la lumière ; mais la moindre action mécanique peut l'endommager ; il suffit en effet de passer la main ou un tampon de coton sur sa surface pour enlever les parties claires et détruire l'effet dû à l'action de la vapeur mercurielle. M. Fizeau (1) a indiqué une réaction qui possède, en outre de l'avantage de rehausser les tons du dessin, celui de rendre fixe ce dessin sur la surface du plaqué, de sorte qu'un très-léger frottement ne peut l'enlever. Cette réaction consiste dans le dépôt d'une légère couche d'or à la surface de la lame ; pour l'obtenir, il s'était servi d'une dissolution de chlorure d'or dans l'hyposulfite de soude ; mais depuis que MM. Fordos et Gelis (2) ont reconnu que le composé actif formé dans cette circonstance est un double hyposulfite d'or et de sodium, on emploie généralement une dissolution de 1 gr. de ce double hyposulfite cristallisé dans 800 gr. d'eau ou même dans 1,000 gr. d'eau. On place sur un trépied la lame de plaqué qui vient d'être lavée à l'hyposulfite de soude puis à l'eau distillée, et qui est encore humide, et à l'aide de vis calantes on la rend parfaitement horizontale ; on verse sur sa surface une couche de la dissolution précédente, de façon à ce qu'elle ait une épaisseur de 1 millim. environ, et l'action capillaire qui a lieu vers les bords main-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, p. 237 et 906.
(2) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 13, p. 394 (1843).

tient cette dissolution sur la surface de la lame; on chauffe cette lame par dessous à l'aide d'une lampe à alcool et quand les bulles de vapeur commencent à se dégager, on rejette l'excès de dissolution, on lave la lame à l'eau distillée et on la fait sécher. On trouve alors que l'or s'est fixé sur le fond bruni de l'argent, ce qui donne du ton aux noirs de l'image; en même temps, l'amalgame d'or conservant une teinte blanche, les blancs ne sont pas altérés, et de plus un léger frottement ne détruit pas le dessin.

### § 2. *Action de la lumière lors de la formation de l'image daguerrienne. Action des rayons différemment réfrangibles.*

Telle est la méthode suivie actuellement quand on veut reproduire les images de la chambre noire sur une lame de plaqué d'argent. On voit, en résumé, que cette lame recouverte d'iodure d'argent mêlé de chlorure ou de bromure, et qui placée au foyer de la chambre noire aurait demandé un temps très-long pour produire une image, lorsqu'elle est exposée à l'action de la vapeur mercurielle, après une courte impression à la lumière, donne une image qui apparaît immédiatement.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer cet effet consiste à supposer que l'iodure d'argent impressionné est changé en sous-iodure (voir page 76), et que ce sous-iodure en présence de la vapeur de mercure donne de l'argent métallique qui s'amalgame avec elle, et de l'iodure qui, restant à la surface de la lame, est ensuite dissous par l'hyposulfite de soude. Il faut remarquer toutefois que dans cette réaction si curieuse de la vapeur de mercure le dépôt de mercure ne paraît pas en rapport avec l'action exercée sur la couche d'iodure d'argent, puisque cette réaction est inappréciable par tout autre réactif, et que la quantité de mercure fixée sur la lame est plus grande que celle du sous-iodure d'argent formé. C'est même le motif qui avait fait attribuer la condensation de la vapeur mercurielle à une modification physique de la couche d'iodure.

M. Carey Lea (1), d'après cette hypothèse, a fait plusieurs expériences curieuses dans le but de montrer qu'une action physique exercée sur l'iodure d'argent pouvait mettre cette substance dans des conditions analogues à celles que lui communique la lumière; ainsi, la pression

(1) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 12, p. 64, 88, 147 (1866), et t. 13, p. 182, 1867. Ces expériences ont été répétées par M. A. Girard.

de même que le contact d'un objet sur une surface sensible d'iodure d'argent peut permettre de développer une image par les procédés ordinaires, comme on la développe après l'action lumineuse. Dès lors M. Carey Lea pense que la lumière agit en donnant à l'iodure une impression physique qui peut se perdre peu de temps après, de même que l'impression phosphorescente de certains corps. Mais de ce que l'iodure peut être mis dans des conditions analogues par des actions physiques ou chimiques, il ne s'ensuit pas que l'influence de la lumière doive être purement physique; il résulte au contraire des effets dont il a été question dans le Ier chapitre du livre précédent, ainsi que des phénomènes électrochimiques produits sous l'influence des rayons lumineux, que l'hypothèse basée sur la décomposition chimique de l'iodure est la plus probable.

L'image que l'on fait apparaître par l'action de la vapeur de mercure peut être obtenue sans l'intervention d'aucune substance et par l'influence seule de la lumière ; dans ce cas, la réduction de l'argent métallique qui suit une action commencée est encore la preuve de l'action chimique exercée sur les lames daguerriennes après une courte exposition à la lumière, bien que cette dernière action ne soit pas immédiatement appréciable. Pour observer cet effet, il faut avoir recours aux phénomènes de continuation que j'ai observés en 1840, et dont on a parlé page 76 : on a vu qu'une plaque daguerrienne simplement iodée exposée pendant un temps très-court à l'influence de la lumière, et même pendant un temps inférieur à celui qui est nécessaire pour qu'elle fixe la vapeur de mercure, continue à être impressionnée dans la partie rouge et jaune du spectre solaire, comme si elle eût été exposée à l'action des rayons primitivement actifs bleus et violets. On peut obtenir de semblables effets avec des écrans de verre jaune et rouge; et même, comme on l'a déjà dit page 77, cette action est telle qu'une image daguerrienne commencée et provenant d'une simple exposition à la chambre noire, image qui est encore latente, exposée sous un verre jaune à l'influence de la lumière solaire, apparaît peu à peu sous l'influence seule des rayons qui ont traversé cet écran coloré, et la réduction de l'argent métallique dans les parties primitivement insolées donne du blanc comme l'aurait fait la vapeur de mercure ; ainsi, par la lumière seule, en choisissant la réfrangibilité des rayons actifs, on obtient des images de la chambre noire sur l'iodure d'argent. Ces images sont ensuite lavées et fixées comme il a été dit plus haut.

Il est évident, d'après cela, que même dès les premiers moments de l'impression lumineuse sur l'iodure d'argent, la décomposition chimique de ce corps est commencée, et que dès lors les réactifs tels que la vapeur mercurielle peuvent continuer cette action, comme le font certains rayons de lumière après un temps suffisant. Nous verrons également, dans le courant de ce livre, que les lames iodurées et impressionnées plongées dans des bains métalliques, et en rapport avec le pôle négatif d'un appareil voltaïque, peuvent donner lieu à une précipitation de métal qui s'opère inégalement suivant l'impression primitive de la surface; dans ce cas, la différence de composition de la substance est mise en évidence autrement que par la vapeur de mercure et par l'action des rayons lumineux les moins réfrangibles.

Les lames de plaqué d'argent simplement iodurées, ou attaquées par l'iode et le chlorure d'iode, offrent bien les effets de continuation sous l'influence de la partie rouge et jaune du spectre; mais si elles ont reçu du brome, comme on l'a vu, page 90, elles ne manifestent plus ce phénomène remarquable. Il faut remarquer que les verres jaunes sont les écrans les meilleurs pour obtenir les tons blancs lorsqu'on veut se servir de la lumière seule pour reproduire les images de la chambre noire; les verres rouges donnent aussi les effets de continuation, mais quand ils sont trop foncés, ils ne laissent passer que la partie extrême la moins réfrangible du spectre, et alors la réduction métallique se complique des actions inverses dont il a été question page 91.

L'étendue de la partie active du spectre lumineux sur l'iodure d'argent, comme on l'a déjà vu, et comme cela résulte de l'inspection de la figure 46, explique comment les objets colorés viennent inégalement bien

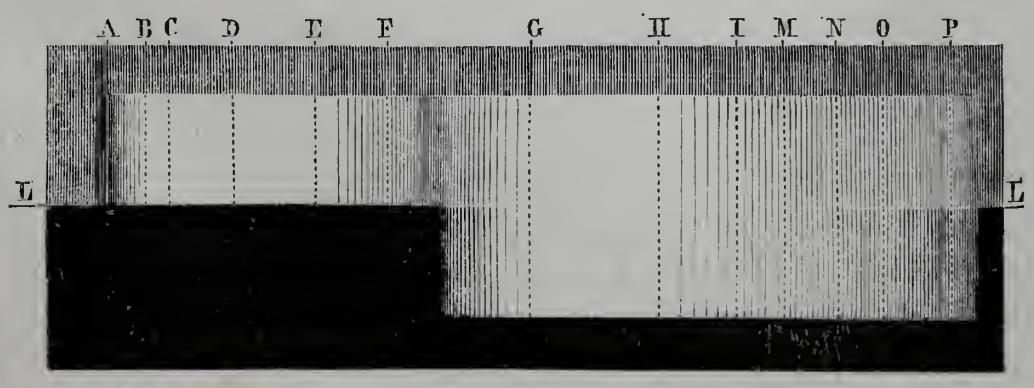



Fig. 46.

dans la reproduction des images par le daguerréotype. Les rayons bleus, violets et ultra-violets, compris depuis G jusqu'en P, étant les seuls qui

commencent et continuent l'action chimique sur l'iodure d'argent, les objets qui par diffusion émettent des rayons de cette réfrangibilité sont les seuls aussi qui donnent des rayons actifs et dont les images puissent apparaître; ceux qui n'envoient dans la chambre noire que des rayons peu réfrangibles jaunes et rouges ne doivent pas mieux venir que des objets noirs, c'est-à-dire qu'ils forment ombres. Mais comme en général les objets donnent par diffusion des lumières composées, il en résulte que même avec des tons rouges ils émettent souvent quelques-uns des rayons très-réfrangibles, et peuvent alors présenter des demi-teintes et des dégradations de tons.

Dans la reproduction des objets colorés et des tableaux, il faut avoir égard à ces divers effets. Si l'on remarque que les rayons verts, jaunes et rouges, quand on se sert d'iodure d'argent simple ou d'iodure mélangé de chlorure, exercent également une action quand la substance a reçu un commencement d'impression, il y aurait avantage à se servir alors de lames que l'on aurait exposées préalablement à la lumière diffuse pendant un temps assez court pour que l'image ne soit pas voilée, mais suffisant pour que les rayons les moins réfrangibles puissent agir. Lorsqu'on emploie des plaques d'argent iodurées puis bromurées, la fig. 45, page 83, indique que l'impression prismatique du côté du vert est plus longue qu'avec l'iodure simple, et que certains tons verts qui ne viendraient pas dans ce dernier cas présentent des demi-teintes après la fixation de l'image ; de là un meilleur résultat, mais il ne faut pas que la lame ait vu le jour avant l'action de la chambre noire.

On peut remarquer encore que les objets bleu clair apparaissent comme des objets blancs, car les uns comme les autres envoient à peu près autant de rayons actifs sur la plaque impressionnable; les objets verts au contraire, tels que les feuilles dans un paysage, apparaissent presque comme des corps noirs. J'ai pensé alors, comme je l'ai proposé, que si l'on plaçait devant l'objectif d'une chambre noire un écran coloré en vert clair de façon à faire voir tous les objets sous le même ciel, c'est-à-dire à enlever les rayons les plus réfrangibles trop actifs, on augmenterait le temps de la pose à la chambre noire bien entendu, mais on aurait plus de demi-teintes dans les objets qui sont colorées des nuances vertes et jaunes (1).

La reproduction des images de la chambre noire par l'action de la

(1) *Mém. des savants étrangers de l'Acad. des sciences*, t. 8, page 381 (1840).

vapeur de mercure donne lieu à un effet qu'il est important de signaler, car il limite le temps d'exposition de la surface sensible au foyer de la chambre noire, sans quoi l'on est exposé à obtenir des épreuves dans lesquelles les noirs et les blancs n'ont plus les mêmes intensités relatives. On observe que si l'iodure impressionné fixe la vapeur de mercure de façon à donner, par contraste, une teinte blanche par rapport au fond bruni de la plaque, lorsque la durée de l'impression a dépassé une certaine limite, la vapeur de mercure en se fixant sur les parties impressionnées, s'étale pour ainsi dire et donne une surface miroitante qui paraît sombre au lieu de rester blanche ; les parties de la surface où l'impression lumineuse a été trop vive sont alors dites solarisées. On ne peut remédier à cet inconvénient que présente le mercure et il faut nécessairement limiter la durée de l'exposition de la surface impressionnable à la chambre noire.

# CHAPITRE II.

## Photographie. Épreuves sur papier, sur collodion, albumine, gélatine, etc.

### § 1. *Épreuves négatives, ou clichés.*

*Épreuves sur papier.* — Après que l'on eut perfectionné le procédé de Daguerre pour fixer les images de la chambre noire, on comprit que pour que cette magnifique découverte pût être utilisée dans un grand nombre de circonstances, il fallait obtenir les images, non pas sur une surface miroitante comme une surface métallique, mais sur papier, et même qu'une impression étant obtenue, il était nécessaire que l'on pût en reproduire un grand nombre d'exemplaires.

Si l'on plaçait au foyer d'une chambre noire une feuille de papier, de coton, d'étoffe, enduite d'un sel d'argent, on sait qu'après un temps suffisamment long on obtiendrait une image inverse de celle des objets, c'est-à-dire négative ; les parties claires seraient représentées en noir et réciproquement. Si l'on eût eu un moyen d'activer cette réaction, on aurait même résolu avant Daguerre le problème de la fixation

des images de la chambre noire : en effet, après une exposition de courte durée, l'impression est commencée et la continuation de coloration sous l'influence des verres rouges et jaunes (1), montre que sur papier sensible l'image latente peut apparaître dans des conditions analogues à celles dans lesquelles elle se montre sur les plaques d'argent iodurées par l'influence de la vapeur de mercure.

M. Talbot, en 1841 (2), découvrit une réaction chimique qui lui permit d'atteindre ce but : cette réaction consiste essentiellement en ce que si une feuille de papier enduite d'un sel d'argent, par exemple d'iodure avec excès d'azotate, est exposée pendant un temps très-court au foyer de la chambre noire, vue à l'aide d'une bougie à l'abri de la lumière du jour elle ne présente aucune trace de l'image; mais que si on la plonge alors dans une dissolution d'acide gallique (ou, comme le faisait M. Talbot, dans un mélange d'acide gallique et d'azotate d'argent, c'est-à-dire de gallonitrate d'argent), et qu'on élève un peu la température, l'image apparaît aussitôt, les parties de la surface qui ont été frappées par la lumière devenant noires. L'acide gallique agit donc comme réductif, mais ne porte son action que sur les parties frappées par la lumière, et cela suivant l'intensité de l'action lumineuse. On fixe l'image obtenue comme à l'ordinaire, en lavant le papier, d'abord à l'eau, puis avec une dissolution d'hyposulfite de soude; ensuite, cette image étant négative, on s'en sert comme d'un cliché, on la copie par décalcage autant de fois que l'on veut sur des feuilles de papier impressionnable de chlorure ou de bromure d'argent, et l'on a alors des images positives du paysage ou du dessin que l'on a voulu reproduire.

La partie essentielle de cette méthode est l'action réductrice qu'exerce l'acide gallique sur le sel d'argent impressionné, et qui est analogue à celle que la vapeur de mercure exerce sur l'iodure d'argent formé à la surface d'une plaque d'argent; on a déjà parlé de ces actions, chapitre Ier, page 77, et l'on a vu que non-seulement la matière organique oxydable continue à réduire l'iodure impressionné, mais encore que si une solution argentifère se trouve mélangée à l'acide gallique, et qu'au lieu d'opérer avec du papier sensible on se serve de collodion, comme on le verra plus loin, de l'argent métallique provenant de la dissolution se fixe sur les parties réduites (3), en sorte que

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, page 102, 1840.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 12, p. 1055, 1841.

(3) *Mémoire* de M. Davanne. — *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 3, p. 136

l'image contient plus d'argent qu'il ne s'en serait déposé si la couche impressionnable seule eût été réduite. Il est probable, comme on l'a déjà dit à l'occasion du daguerréotype, page 175, pour rendre compte de l'effet de la vapeur de mercure, que l'acide gallique réduit d'abord l'iodure d'argent qui a commencé à s'impressionner, et que, par action moléculaire, le dépôt d'argent peut continuer à se faire dans les mêmes parties. Ce dépôt doit être d'autant plus énergique que l'action lumineuse primitive a été plus vive, car il est possible, même sur collodion après la fixation de l'épreuve, de renforcer une image trop faible de ton en la plongeant successivement dans un bain d'azotate d'argent et dans un bain d'acide gallique; ce qui montre que l'argent réduit ne se dépose pas uniformément sur la surface, mais en plus ou moins grande proportion suivant l'épaisseur du dépôt primitif.

Tel est en principe la méthode de M. Talbot, qui sert de base aux différents procédés photographiques en usage, car en incorporant l'iodure d'argent à l'albumine, à la gélatine, au collodion, on a les mêmes effets que sur le papier et en se servant d'autres sels ou d'autres matières réductrices, telles que l'acide pyrogallique, le protosulfate de fer, le phénomène de l'apparition de l'image se fait dans des conditions analogues. En somme, c'est toujours l'iodure, le bromure ou le chlorure d'argent qui sont les matières impressionnables, et les procédés des divers opérateurs, quoique pouvant donner des épreuves plus ou moins belles, sont fondés sur des réactions analogues à celle dont on vient de parler. Le but de cet ouvrage n'étant pas de présenter un traité de photographie, on se bornera à indiquer les principes généraux des méthodes les plus usitées, et surtout de celles qui sont fondées sur des réactions particulières au point de vue de l'action de la lumière. On pourra, pour de plus amples détails, consulter les nombreux traités de photographie publiés dans ces dernières années (1).

D'après ce qui a été dit plus haut, pour obtenir une épreuve photographique, il faut deux séries d'opérations bien distinctes :

La première comprend la formation de l'épreuve négative, c'est-à-dire du cliché;

(1) *Bullet. de la Société franç. de photographie.* — Barreswil et Davanne, *Chimie photographique.* — Davanne et Girard, *Recherches théoriques et pratiques sur les épreuves positives.* — Van Monckhoven, *Traité général de photographie.* — Id., *Traité d'optique photographique.* — Hardwich, *Manual of photographic chemistry.* — Th. Sutton, *The collodion process*, etc. — Sella, *Plico del fotografo*, etc., etc.

La deuxième, la formation de l'épreuve positive ou la reproduction de l'image de la chambre noire.

La première série d'opérations est la plus importante; la seconde, quoique étant en réalité un simple tirage, présente des difficultés, et demande à être très-bien exécutée.

La formation de l'épreuve négative ou du cliché comprend :

1° La formation de la couche sensible,

2° L'exposition à la chambre noire,

3° Le développement et quelquefois le renforcement de l'image,

4° Le lavage de l'épreuve et sa fixation.

La méthode de M. Talbot fut peu suivie pendant plusieurs années, et l'attention ne se porta principalement sur elle qu'après que M. Blanquart-Évrard eut indiqué, en 1847 (1), les précautions à prendre pour obtenir avec certitude de bons résultats. Le procédé qu'il décrivit est au fond le même que celui de M. Talbot et n'en est qu'un perfectionnement, car il ne signala aucune réaction nouvelle ; il opérait comme il suit :

Il déposait sur une feuille de papier une couche d'iodure d'argent mêlé de bromure, en plaçant d'abord une feuille de papier de façon à ce qu'elle posât seulement d'un côté sur une dissolution d'une partie d'azotate d'argent dans 30 parties d'eau, puis en laissant sécher ce papier et en le faisant plonger pendant une ou deux minutes dans une dissolution de 25 parties d'iodure de potassium, 1 de bromure de potassium et 560 d'eau ; en lavant la feuille de papier à l'eau distillée et en la faisant sécher, cette feuille de papier pouvait se conserver pendant longtemps.

Quand on voulait se servir de cette surface impressionnable, on versait sur une glace de verre quelques gouttes d'une dissolution de 6 parties d'azotate d'argent, 11 parties d'acide acétique et 64 d'eau (c'est-à-dire ce que l'on appelle de l'acéto-nitrate d'argent) et, dans l'obscurité, on appliquait contre le verre une feuille du papier sensible de façon à ce que la couche impressionnable fût en contact avec lui. On pressait le papier avec quelques doubles de papier buvard humide et une seconde glace, et on exposait le tout à la chambre noire de manière que la lumière vînt frapper la surface sensible au travers de la première glace. On voit que l'iodure d'argent avec excès d'azotate était impressionné par la lumière, et recevait une impression qui pouvait

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 24, p. 117, 1847.

être continuée à l'abri de la lumière. Lorsque la durée de l'action lumineuse était suffisante, on enlevait le papier impressionné, on le déposait sur une surface de verre ou de porcelaine, et on y versait un peu d'une dissolution saturée d'acide gallique dans l'eau; l'image apparaissait aussitôt. On fixait avec l'hyposulfite de soude ou le bromure de potassium, et l'on avait ainsi l'image négative ou le cliché, qui pouvait servir à donner, par transparence, avec un papier sensible de chlorure d'argent une épreuve positive.

*Épreuves sur albumine, gélatine, collodion, etc.* — Cette méthode a encore été modifiée et perfectionnée : on a imbibé le papier avec de la gélatine, de l'albumine, de la cire, de la paraffine, et l'on put alors opérer à sec, ce qui permit de reproduire aisément les paysages; aussi quelques voyageurs l'emploient-ils encore dans ce dernier cas, en raison de la facilité de transport des clichés. Cependant, le déplacement des fibres du papier lors de l'imbibition des liquides fit penser qu'il serait préférable, pour la netteté des images, d'obtenir les clichés sur des surfaces qui ne subiraient aucun changement par suite des lavages successifs que nécessitent les opérations; de là la photographie sur verre. On se servit d'abord d'une couche d'albumine déposée sur une glace (1) et à laquelle on incorporait le sel d'argent; on employa également la gélatine (2); mais depuis que l'on a fait usage du collodion (3) pour retenir sur le verre le composé d'argent impressionnable dont la réduction donne l'image de la chambre noire, la facilité avec laquelle le dépôt de cette substance s'opère même sur de grandes surfaces, la rapidité de la préparation et la beauté des épreuves ont fait généralement préférer cette méthode, qui est aujourd'hui presque exclusivement employée par les photographes.

On opère la plupart du temps quand la couche de collodion est encore humide; cependant, comme on le verra plus loin, on peut également s'en servir quand elle est sèche.

Pour préparer le pyroxyle (fulmi-coton) soluble dans l'éther et l'alcool, on traite le coton cardé par un mélange d'azotate de potasse et d'acide sulfurique; on peut employer le mélange :

(1) Niepce de Saint-Victor, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 26, p. 637, 1848.

(2) Poitevin, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 30, p. 647, 1850.

(3) M. Le Gray a indiqué en 1850 l'emploi du collodion, mais le principe de la méthode suivie actuellement a été donné, la même année, par MM. Fry et Archer.

| | |
|---|---|
| Coton cardé, | 30 gr. |
| Azotate de potasse, | 540 |
| Acide sulfurique ordinaire, | 450 |

Quand la réaction a eu lieu, on lave le produit et on le sèche.

On forme alors la dissolution de collodion normal, qui peut se conserver assez longtemps sans s'altérer; pour cela, on mélange de l'alcool avec de l'éther, et l'on dissout le fulmi-coton; si l'on employait l'éther seul, l'évaporation serait trop rapide à la surface du verre. On a proposé un grand nombre de formules de collodion normal, et chaque photographe a pour ainsi dire la sienne. On indique ci-après plusieurs préparations mentionnées dans les traités de photographie :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Fulmi-coton. . . | 2 gr.,5 | Fulmi-coton. . . | 1 gr.,5 | Fulmi-coton. . | 5 gr. |
| Éther à 58°. . . | 200 c. c. | Éther. . . . . | 100 c. c. | Éther. . . . . | 300 c. c. |
| Alcool à 40°. . . | 50 c. c. | Alcool. . . . . | 30 c. c. | Alcool. . . . . | 180 c. c. |

Ces collodions, surtout les deux premiers, sont d'une évaporation rapide par suite d'une trop grande quantité d'éther; habituellement on emploie aujourd'hui, pour 10 parties de fulmi-coton,

| | | |
|---|---|---|
| Éther 600<br>Alcool 400 | ou | Éther 500<br>Alcool 500 |

Une petite quantité de la dissolution versée sur une glace tenue horizontalement et inclinée pour répandre le liquide sur toute la surface, donnerait par évaporation en quelques secondes une couche de collodion adhérent au verre; mais pour y incorporer un sel d'argent on a soin de mélanger au liquide un iodure ou un bromure, et ensuite, comme on va le voir, on forme par double décomposition le composé impressionnable d'argent. On a conseillé de dissoudre les iodures et les bromures de la plupart des métaux dans le collodion qui doit être déposé sur le verre; quoiqu'il ne paraisse pas probable que la nature de la base influe sur le degré de sensibilité du collodion, il paraît qu'on trouve les conditions d'hygroscopicité convenables dans l'usage des sels de cadmium, de sorte qu'au lieu d'employer les chlorures ou les iodures alcalins on peut avoir recours à ces sels.

On mélange ordinairement un bromure avec un iodure, et l'on met à peu près trois fois autant d'iodure que de bromure. Pour 100 cent. cubes des mélanges précédents on a proposé d'ajouter 1gr.25 d'iodure

de cadmium et quelques gouttes d'une solution de bromure de cadmium, ou bien 1gr. d'iodure de zinc et 0gr·30 de bromure de cadmium. On fait dissoudre ces sels, et quand la dissolution est faite le collodion est prêt à être employé; on nettoie alors parfaitement la glace sur laquelle le dépôt doit s'opérer, et on verse lentement la quantité de collodion nécessaire pour couvrir sa surface; on rejette l'excès de liquide, et on attend quelques secondes, puis on plonge de suite cette glace recouverte de collodion encore humide dans un bain d'azotate d'argent.

Ce bain est formé par une dissolution de 7 à 8 parties d'azotate d'argent pur fondu, pour 100 parties d'eau; quelquefois, quand le bain n'a pas servi, on y ajoute une petite quantité d'iodure d'argent. Le bain d'argent se place dans une cuvette en gutta-percha à rebords relevés et dont les dimensions sont au moins deux fois celles de la glace. On soulève la cuvette de manière à laisser libre une place où l'on dépose la glace, et on ramène rapidement la cuvette dans la position horizontale, sans quoi des taches se manifesteraient plus tard sur les parties où l'écoulement du bain se serait arrêté. La couche de collodion avant son immersion paraît presque transparente, mais aussitôt plongée elle prend une couleur laiteuse, due à l'iodure et au bromure d'argent qui se forment par double décomposition; puis toute trace d'alcool provenant de la couche est bientôt éliminée de la dissolution, et on retire la glace en se servant d'un crochet en platine. La glace est alors recouverte d'une couche de collodion sensible et encore humide que l'on place au foyer de la chambre noire, comme on avait placé le papier sensible ou la plaque d'argent iodurée. Il est donc inutile d'ajouter ici que cette préparation doit être faite dans l'obscurité ou du moins dans la pièce éclairée seulement à l'aide de la lumière orangée ou jaune.

On a reconnu qu'il y avait avantage à se servir d'un mélange d'iodure et de bromure d'argent au lieu d'employer de l'iodure isolé; cependant, on pourrait incorporer au collodion une quelconque de ces trois substances, iodure, bromure ou chlorure. D'un autre côté, physiquement, au point de vue de la reproduction des images de la chambre noire, il y a avantage à employer du bromure, car on sait, comme on l'a vu page 85, que dans le spectre solaire le bromure d'argent est impressionné plus loin du côté du rouge que les deux autres composés, et dès lors des objets qui envoient des rayons de réfrangibilité moyenne peuvent produire une impression sur le bromure quand ils

n'en auraient donné qu'une plus faible sur l'iodure. Ainsi, par l'emploi du bromure d'argent on doit avoir plus de demi-teintes qu'avec l'iodure ou le chlorure de ce métal.

La durée de l'exposition de la glace collodionnée sensible au foyer de la chambre noire ne doit pas être plus longue que celle de la plaque daguerrienne bromurée, c'est-à-dire que cette surface est d'une très-grande impressionnabilité; mais rentrée dans l'obscurité et vue à la lumière rouge, de même que le papier sensible elle ne donne aucune apparence du dessin; il faut pour cela l'intervention d'un réactif, d'un sel réducteur, qui agit de la même manière que sur les papiers sensibles et continue l'action commencée par la lumière. L'acide gallique peut servir pour opérer cette réaction; mais comme l'effet produit est une réduction à l'état métallique du sel d'argent déjà impressionné, on pourrait employer la plupart des proto-sels tels que ceux de fer, de manganèse, ainsi qu'un certain nombre de matières organiques, car ces substances en s'oxydant aux dépens du sel d'argent conduiraient au même résultat. On emploie habituellement, en outre de l'acide gallique, l'acide pyrogallique, le protosulfate de fer ou le double sulfate de fer et d'ammoniaque. L'acide gallique, additionné d'azotate d'argent, donne de bons résultats. L'acide pyrogallique, dont l'emploi a été indiqué par M. V. Regnault, produit d'excellents effets, mais il agit trop vite, et en acidulant la dissolution aqueuse avec de l'acide acétique ou tartrique, on modère l'effet produit, et on le régularise. Le protosulfate de fer fait apparaître immédiatement l'image.

Quand on opère avec l'acide pyrogallique, on verse la dissolution sur la surface. Avec le protosulfate de fer on agit de même; on pourrait cependant opérer par immersion dans une cuvette qui renferme la dissolution. On a proposé de se servir d'un mélange d'acide gallique et de sulfate ferrugineux, mais cette dissolution est peu usitée; elle est ainsi composée :

| | |
|---|---|
| Protosulfate de fer. . . . . | 20 gr. |
| Eau. . . . . | 100 |

On fait dissoudre, et on ajoute une dissolution formée comme il suit :

| | |
|---|---|
| Acide gallique. . . . . | 4 gr. |
| Acide acétique cristallisable. . . . . | 5 |
| Acide azotique, quelques gouttes. | |

Quand le mélange a lieu, il se forme du gallate de fer s'il n'y a pas d'acide azotique dans le bain.

On peut aussi employer

| | |
|---|---|
| Proto-sulfate de fer. . . . . | 30 gr. |
| Eau. . . . . | 420 |

En ajoutant à la dissolution,

| | |
|---|---|
| Acide pyroligneux. . . . . | 24 c. c. |
| Alcool. . . . . | 8 |

On opère plus généralement aujourd'hui avec une dissolution de protosulfate de fer étendue formée de 100 parties d'une dissolution de protosulfate saturée à froid et 900 d'eau ou bien de 4 parties de sulfate cristallisé pour 100 d'eau. La dissolution étant acidulée préalablement, on la verse sur l'épreuve, et on laisse celle-ci apparaître.

Quoique le résultat final produit par ces diverses substances soit le même, c'est-à-dire que l'on ait de l'argent métallique, cependant les tons de l'image ne sont pas semblables, ce qui semble indiquer un état moléculaire différent du composé métallique réduit; ainsi avec l'acide gallique on a des noirs très-intenses; avec le protosulfate de fer, l'argent est réduit à l'état blanc.

Lorsque l'image négative est ainsi obtenue, on la lave à grande eau, puis on la plonge dans un liquide qui dissout l'iodure ou le bromure non décomposé, et qui la fixe. On se sert en général de l'hyposulfite de soude; quelquefois, on fait usage d'une dissolution contenant 3 parties de cyanure de potassium pour 100 d'eau; mais ce dernier liquide est fort actif et peut altérer les parties faibles des clichés dans le cas où on le laisserait agir pendant trop long temps : c'est pour ce motif que l'hyposulfite de soude est préféré. Maintenant que les sulfo-cyanures sont préparés industriellement en assez grande quantité, on commence à en faire usage pour le même but. Quand l'image est fixée, on la lave encore, puis on la laisse sécher.

Lorsque par un défaut de durée d'exposition à la chambre noire, le cliché n'a pas assez de ton, il faut chercher à lui donner plus d'opacité dans les parties qui ont été frappées par la lumière. On a vu précédemment, page 78, qu'en plongeant successivement la glace recouverte de collodion dans un bain d'azotate d'argent et dans un bain réducteur,

acide gallique ou pyrogallique, on fixait plus d'argent dans les parties les plus impressionnés, ce qui permettait d'atteindre le but désiré. On a également proposé d'attaquer la couche d'argent métallique qui forme le dessin négatif, et de la transformer en sulfure, chlorure, etc., ce qui la rend moins transparente. On emploie alors une faible dissolution de sulfhydrate d'ammoniaque, du bichlorure de mercure, ou d'autres substances. Quand le cliché est dans l'état que l'on juge le plus convenable, après l'avoir bien lavé et laissé sécher, on le couvre d'une très-légère couche de vernis, de sorte que par frottement on ne risque plus de le rayer ni de le détruire.

*Épreuves sur collodion sec.* — La méthode qui vient d'être décrite suppose que la glace est exposée au foyer de la chambre noire aussitôt après sa préparation, c'est-à-dire que l'on opère avec la surface collodionnée sensible humide. L'on a cherché à conserver à cette couche sa sensibilité pendant un temps plus ou moins long après sa préparation, afin de la rendre applicable à la production des vues dans les voyages. Plusieurs procédés ont été donnés successivement, soit en recouvrant le collodion sensibilisé d'une couche d'une substance hygroscopique, soit en l'enduisant de gélatine, d'albumine ou de résine. Parmi ces derniers procédés, qui avaient reçu le nom de procédés au collodion sec, on doit citer celui décrit par M. Taupenot (1), lequel est basé sur l'emploi d'une couche d'albumine, qui, bien que d'une manipulation délicate, avait donné de bons résultats. Mais depuis que M. Russel (2) a montré le parti que l'on pouvait tirer d'une couche de tannin pour atteindre facilement le même but, cette dernière préparation a été généralement préférée.

On opère alors comme il suit : la glace est recouverte de collodion et sensibilisée à la manière ordinaire; au sortir du bain d'azotate d'argent, elle est lavée avec soin à l'eau distillée, de manière à enlever tout l'azotate libre. On verse, sur la glace, une solution de tannin faite dans la proportion de 1 gramme de tannin pour 32 grammes d'eau, c'est-à-dire à peu près 3 pour 100 de tannin, et en quantité suffisante pour la couvrir; on laisse écouler l'excès de liquide, et l'on fait sécher la couche. L'opération doit être faite à l'abri de toute lumière et même,

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 41, p. 383. — *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 1.

(2) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, tomes 7, 9 et 10. Le procédé au tannin par M. C. Russel, *traduction* par M. A. Girard (1864).

si on faisait sécher la glace à l'aide d'un foyer embrasé, la lumière du foyer pourrait l'altérer.

Avec des glaces ainsi préparées, l'exposition, dans les circonstances égales, est six ou huit fois plus longue qu'avec des glaces préparées au collodion humide. Lorsqu'on veut procéder au développement de l'image, la glace est d'abord mouillée à l'eau distillée, puis on développe l'image avec l'acide gallique et l'azotate d'argent. La concentration du liquide qui fait apparaître l'image doit varier suivant les circonstances, mais en général une partie d'acide pyrogallique pour 300 d'eau suffit; on ajoute quelques gouttes d'une solution d'azotate d'argent, que l'on peut aciduler avec l'acide citrique. L'addition de ce dernier acide donne des tons noirs, et la substitution de l'acide acétique à l'acide citrique donne des tons rouges aux parties métalliques réduites.

### § 2. *Épreuves positives aux sels d'argent. Épreuves positives directes à la chambre noire.*

*Épreuves positives aux sels d'argent.* — La seconde série d'opérations destinées à produire les épreuves positives consiste essentiellement à placer au-dessous du cliché négatif une feuille de papier recouverte de chlorure d'argent et à presser les deux surfaces dans une presse semblable à celle indiquée dans la figure 58 représentée ci-contre; une des faces est une glace en verre, et se trouve cachée dans le dessin; le fond mobile qui presse contre cette glace est en bois garni de drap. On place d'abord dans l'obscurité le chiché négatif contre le verre, puis on applique la feuille de papier sensible contre le cliché, et on recouvre le tout d'une feuille de papier qui est pressée par le fond mobile; ce fond est appuyé à l'aide d'une fermeture à ressort dont le système est variable à volonté.

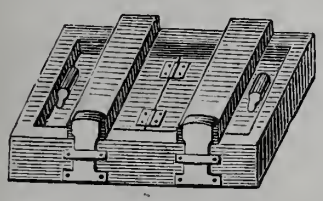


Fig. 58.

On expose alors le châssis à la lumière solaire ou à la lumière diffuse, suivant la force ou la faiblesse des clichés, et l'on regarde de temps à autre si le papier sensible qui dépasse le cliché est suffisamment noirci; on retire alors l'épreuve positive, on la baigne dans une dissolution d'hyposulfite de soude, qui dissout les parties non impressionnés et réagit sur le sel altéré en donnant de l'argent métallique, et on la plonge dans de l'eau ordinaire; l'épreuve positive

est alors fixée et peut rester à la lumière sans s'altérer. On peut changer et augmenter le ton de l'épreuve au moyen de diverses réactions chimiques, ce que les photographes appellent faire virer l'épreuve, et la production de l'image positive est terminée.

On voit, en résumé, que la série d'opérations pour la formation des épreuves positives au moyen d'un cliché négatif comprend :

1° La formation de la couche impressionnable,
2° La production de l'image,
3° Le lavage et la fixation de l'épreuve,
4° Le virage.

Mais dans l'exécution de cette partie du travail photographique il se produit des réactions qui font souvent varier la coloration, la netteté, l'intensité et la solidité de l'image ; MM. Davanne et Girard (1) ont montré quels sont les principaux effets que l'on observe et quelles sont les précautions à prendre pour éviter les circonstances diverses qui seraient contraires à la bonne exécution des épreuves.

Examinant d'abord l'influence de l'encollage du papier, ils ont reconnu que cette préparation est cause des diverses colorations que les épreuves présentent, et ils pensent qu'au moment de l'action de la lumière l'influence de la matière organique se fait sentir, de sorte que le phénomène n'est plus le même que si le chlorure d'argent était isolé. D'après leurs observations, tous les papiers bien fabriqués peuvent être employés pourvu qu'ils soient fortement encollés. On se sert de gélatine et très-fréquemment d'albumine qui permet d'avoir des dessins d'une grande finesse.

On pourrait fixer sur le papier un sel d'argent impressionnable autre que le chlorure, et faire usage de bromure ou d'autres composés que la lumière colore ; mais la pratique a montré que le chlorure donnait de meilleurs résultats. Pour le produire on place la feuille de papier à la surface d'une dissolution de 5 grammes de chlorure de sodium dans 100 grammes d'eau, et on la laisse sécher ; on la plonge alors, quand elle est sèche, dans de l'eau contenant 15 à 20 pour 100 d'azotate d'argent. Souvent on dépose sur le papier la couche d'albumine en même temps que le chlorure alcalin ; on emploie alors une dissolution de 4 à 5 grammes

(1) *Recherches théoriques et pratiques sur la formation des épreuves photographiques positives*, par MM. Davanne et Girard (1864). — *Bulletin de la Société française de photographie*, tomes 1 à 10.

de sel marin (ou de chlorhydrate d'ammoniaque) dans 100 grammes d'albumine. On avait remarqué que les divers chlorures employés pour préparer le chlorure d'argent par double précipitation donnaient des colorations diverses : MM. Davanne et Girard ont montré que ces effets provenaient de l'état d'acidité ou d'alcalinité des bains, ainsi que des matières étrangères qu'ils pouvaient contenir, car les chlorures purs dont ils ont fait usage leur ont donné les mêmes résultats.

Il est important, suivant les mêmes observateurs, que l'azotate d'argent soit en excès en présence du chlorure, car lors de la réduction du chlorure le chlore émis forme avec l'azotate une nouvelle quantité de chlorure qui est à son tour décomposé, de sorte que les noirs sont plus intenses que si le chlorure seul eût été décomposé.

Il n'y a que peu d'observations à faire sur la production de l'image, le temps pendant lequel la lumière agit dépendant de la transparence du cliché et de l'intensité lumineuse active. Quant à la fixation de l'image, elle peut présenter des effets qui ont été analysés par MM. Davanne et Girard et d'après lesquels la conservation des épreuves est plus ou moins bonne. Habituellement on se sert d'hyposulfite de soude; si ce liquide est exempt d'hyposulfite d'argent, c'est-à-dire s'il n'a pas dissous de sel d'argent, et que le papier n'ait pas d'acide azotique en excès, le lavage ne laisse que de l'argent métallique sur le dessin. Mais lorsque ces conditions ne sont pas remplies, l'hyposulfite d'argent est décomposé, et il se forme une plus ou moins grande proportion de sulfure de ce métal à la place d'argent métallique. Ce sulfure, s'il était anhydre et sec, serait fortement coloré; mais en présence de l'humidité et des matières organiques il devient jaune pâle, et cause la décoloration des épreuves photographiques qui n'ont pas été virées. MM. Davanne et Girard pensent que cette teinte jaune est due à une espèce de combinaison ou de laque entre le sulfure d'argent et la matière organique, combinaison probablement hydratée.

On a proposé encore pour fixer les images de faire usage de cyanure de potassium et dans ces derniers temps, comme on l'a déjà dit plus haut, de sulfocyanure d'ammonium (1); mais généralement on se sert d'hyposulfite de soude, comme pour les épreuves négatives.

Lorsque l'épreuve positive est fixée, pour lui donner les meilleures conditions de stabilité possible et changer sa teinte en lui donnant

(1) Proposé par M. Meynier, *Bull. de la Société franç. de phot.*, t. 11, p. 179.

des tons plus ou moins violets ou bruns, on procède au virage, c'est-à-dire à la substitution d'un métal tel que l'or ou le platine à une partie de l'argent qui forme les noirs du dessin. Ce métal ne peut plus subir les mêmes altérations que l'argent, et l'épreuve n'a plus les mêmes chances de détérioration. Ce virage se fait par double décomposition, en plongeant le dessin dans une dissolution d'or ou de platine; généralement, on se sert d'un sel d'or. Il se produit une action analogue à celle qui a lieu quand on plonge une lame d'argent dans une dissolution d'or; de l'argent est dissous, et de l'or se précipite en quantité équivalente.

On s'est servi de dissolutions diverses; en général les bains acides doivent être rejetés, mais on emploie avec avantage une dissolution d'un double chlorure d'or neutre, tel que le double chlorure d'or et de potassium, ou du double hyposulfite d'or et de soude dont on a parlé antérieurement, page 174. Ces dissolutions sont prises de façon qu'il y ait 4 à 5 parties de sel pour 1,000 grammes d'eau. On peut employer également des bains alcalins.

Quelquefois on procède au virage en même temps qu'à la fixation, ou même avant; parmi les dissolutions qui ont été proposées on peut citer les suivantes : On dissout 3 grammes de chlorure d'or dans 1,000 parties d'eau, puis 12 grammes de bi-carbonate ou d'acétate de soude dans la même quantité de liquide, et on mélange les deux dissolutions; ou bien : on dissout dans 2,000 parties d'eau, 10 parties d'acétate de soude, 6 de chlorure de chaux et 2 à 4 parties de chlorure d'or. Avec une dissolution contenant peu d'or, l'action est plus lente et plus facile à suivre, et l'effet obtenu est meilleur.

Les procédés de virage par les sels d'or, de platine ou de métaux non altérables sont les seuls dont on doive faire usage, et il n'y a pas à s'arrêter à l'emploi des sulfures ou hyposulfites que l'on avait employés antérieurement, et qui, donnant lieu à du sulfure d'argent, présentaient bien une coloration assez intense dans les premiers temps, mais ne tardaient pas à manifester l'altération signalée plus haut; cette altération en effet est propre à l'argent sulfuré en présence des matières organiques quand il est exposé à l'humidité.

*Images positives directes.* — Les méthodes décrites ci-dessus ne donnent pas immédiatement les images de la chambre noire, et exigent la formation préalable du cliché ou épreuve négative, mais elles ont l'avantage de fournir autant d'épreuves positives que l'on désire; aussi ces mé-

thodes sont-elles presque exclusivement employées. Néanmoins, dans quelques circonstances, il peut être intéressant d'avoir immédiatement une image positive du dessin de la chambre noire. Plusieurs procédés ont été indiqués; l'un est dû à M. Bayard (1), et repose sur l'action exercée par l'iodure de potassium sur un papier préalablement recouvert de sel d'argent et noirci à la lumière, action qui est telle que sous l'influence des rayons lumineux le papier se décolore; mais cette méthode n'est pas en usage.

Un autre procédé est du à M. A. Martin (2); il consiste à recouvrir une glace d'une couche de collodion assez mince à la manière ordinaire et à l'exposer au foyer de la chambre noire; on la plonge ensuite dans une dissolution de protosulfate de fer au lieu de la traiter par l'acide gallique ou pyrogallique; puis on fixe l'image avec une dissolution de cyanure de potassium. L'action réductrice du protosulfate de fer donne lieu à un dépôt d'argent blanc, et en plaçant la lame de verre sur un fond noir, comme par exemple du velours noir, l'image obtenue est immédiatement positive, c'est-à-dire reproduit les clairs et les ombres de l'image de la chambre noire. On peut opérer sur toile cirée ou sur toute autre surface dont le fond noir forme contraste avec le dépôt blanc de l'argent réduit par le sel de protoxyde de fer.

### § 3. *Épreuves positives diverses. Épreuves au charbon, ou avec des poudres inaltérables.*

La formation des clichés négatifs permet d'obtenir des épreuves positives avec des substances suffisamment impressionnables que l'on peut incorporer au papier ou déposer à sa surface; aussi pourrait-on se servir d'un certain nombre de substances dont il a été question dans le livre II, page 66 et suiv., telles que des combinaisons de métaux qui ont plusieurs degrés d'oxydation, comme le fer, l'urane, l'or, le platine, etc.; ces composés, en effet, par des réactions ultérieures, pourraient donner des nuances diverses aux épreuves suivant la nature et l'état physique du métal ou de la substance formant les ombres. Les composés de fer surtout sont d'un emploi facile pour ce genre d'épreuves; on peut citer parmi les recherches faites sur ce sujet celles de M. J. Her-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 337 (1840). — M. Lassaigne avait observé de son côté la réaction de l'iodure de potassium sur le papier noirci : voir *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 8, page 547 (1839), et t. 10, p. 474 (1840).

(2) *Idem.*, t. 35, p. 29 (1852).

schell (1), de M. Poitevin (2), de M. le duc de Luynes (3), de MM. Reynolds et Phipson (4), etc....

Cependant, les images positives obtenues de cette manière n'offrent pas toute la garantie de stabilité désirable, et M. le duc de Luynes, dans sa sollicitude pour les progrès de la photographie, proposa en 1856 un prix d'après un programme dont les bases, ainsi que le jugement du concours, furent arrêtées par la Société française de photographie (5). Ce prix fut divisé en deux : l'un, de 8,000 francs, pour l'auteur ou les auteurs qui auraient reproduit par la lithographie ou la gravure, sans l'intervention de la main, les merveilles de la photographie; l'autre, de 2,000 francs, destiné à récompenser l'auteur ou les auteurs qui dans une période de deux années auraient fait faire le plus de progrès au tirage des épreuves positives et à leur conservation. Nous aurons occasion de revenir sur le premier prix dans le chapitre suivant; il ne sera question ici que du second.

Parmi les considérants du rapport fait par M. V. Regnault se trouve un passage que l'on doit citer : « Le carbone est de toutes les matières que « la chimie nous a fait connaître la plus fixe et la plus inaltérable à l'ac- « tion de tous les agents chimiques aux températures de notre atmos- « phère..... La conservation des anciens manuscrits nous prouve que le « charbon fixé sur le papier à l'état de noir de fumée se conserve sans « altération pendant bien des siècles. Il est donc évident que si l'on par- « venait à produire les noirs du dessin photographique par le charbon, « on aurait pour la conservation des épreuves la même garantie que « pour nos livres imprimés, et c'est la plus forte que l'on puisse espé- « rer et désirer. »

Ces prix, qui avaient pour but de stimuler le zèle des personnes se livrant aux recherches photographiques, remplirent parfaitement le but que s'était proposé son auteur, et sans aucun doute ont exercé une certaine influence sur les procédés qui ont été publiés dans ces dix dernières années. M. Poitevin, en 1855 (6), en même temps

(1) *Philosoph. transact.*, 1842, t. 132, 2e partie, p. 181.

(2) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 5, p. 157. — *Traité de l'impression photographique sans sels d'argent*, page 140.

(3) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, t. 5, p. 305 et 337.

(4) *Id.*, t. 8, p. 75 et 79.

(5) *Id.*, t. 2, p. 192 et 214.

(6) *Id.*, t. 5, p. 121. — Poitevin, ouvrage cité plus haut, p. 69 et suiv. — *Annales du Conserv. impérial des arts et métiers*, t. 3, p. 169.

qu'il s'occupait d'appliquer à la lithographie l'action exercée par la lumière sur les matières organiques mélangées à l'acide chromique (voir page. 207), cherchait à obtenir directement sur papier des épreuves avec des poudres diverses (charbon, sanguine, etc.), ou bien avec de l'encre grasse. Quelques épreuves de ce genre furent assez satisfaisantes pour être admises en 1855 à l'exposition universelle. A cette époque, M. Poitevin opérait de deux manières :

1° Il recouvrait le papier d'un mélange analogue à celui qu'il déposait sur la pierre lithographique comme on le verra plus loin, et, après l'action préalable de la lumière au travers d'un cliché négatif, il appliquait, avec un tampon, de l'encre grasse sur le papier; l'encre grasse ne restait adhérente qu'aux parties devenues insolubles, et par conséquent lorsqu'on lavait le papier avec de l'eau, la surface présentait un dessin positif.

2° Il appliquait sur le papier une couche uniforme d'un mélange de bichromate de potasse et d'albumine, ou de gélatine, unie à une substance colorante en poudre telle que le charbon. Après la dessiccation de cette couche dans l'obscurité, si l'on impressionnait le papier pendant quelques minutes à la lumière sous le cliché négatif, et qu'on vînt à le laver à l'eau ordinaire, froide ou tiède, suivant la matière organique employée, on trouvait que les parties non impressionnées se dissolvaient, et que le dessin en couleur inaltérable apparaissait retenu et emprisonné par la matière organique devenue insoluble dans toutes les parties qui avaient subi l'action de la lumière, et cela dans la proportion de l'intensité lumineuse active.

Ces principes et surtout ceux de la seconde méthode ont servi de points de départ à divers procédés publiés depuis; aussi la Société française de photographie, à la suite d'un rapport, décerna-t-elle une médaille d'or à M. Poitevin pour les recherches qu'il avait entreprises dans cette direction.

En 1860, M. Fargier vint utiliser les couches épaisses formées avec un mélange de gélatine de bichromate de potasse et de poudre de charbon, pour obtenir des impressions très-belles, mais d'un emploi difficile en raison de la manipulation du procédé; en effet, le perfectionnement apporté par M. Fargier au procédé de M. Poitevin consiste en ce que, après avoir opéré sur le mélange en question et l'avoir impressionné au travers d'un cliché négatif, comme on l'a dit plus haut, on coule sur la surface impressionnée une couche épaisse de collodion, puis on plonge la surface

dans un bain d'eau chaude, qui dissout la gélatine non solidifiée formant le dessous de l'image comme l'avait remarqué antérieurement M. l'abbé Laborde (1); celle au contraire qui est devenue insoluble, et qui retient des particules de noir formant les ombres à la partie supérieure du dessin, reste adhérente à la pellicule de collodion qui nage dans le liquide. On fixe ensuite cette couche de collodion sur du papier gélatiné. Ainsi la couche non altérée par la lumière est dissoute par dessous l'épreuve, et c'est à l'aide du collodion qui sert à relier toutes les parties de l'image que cette opération peut avoir lieu. M. Swan, au moyen de plusieurs manipulations, que nous ne décrirons pas ici (2), a perfectionné ce procédé, qui est devenu très-pratique; aussi peut-on en faire usage pour avoir de très-belles épreuves, qui rendent aussi bien le dessin de la chambre noire que les images positives obtenues avec les mêmes clichés au moyen des sels d'argent.

Les changements d'hygroscopicité de plusieurs sels peuvent conduire également à la formation d'épreuves dans lesquelles le carbone ou des composés inaltérables forment les ombres. M. J. Herschell avait observé (3) qu'une feuille de papier imprégnée d'ammonio-citrate de fer devenait sec et imperméable à l'eau dans les endroits frappés par la lumière. MM. Garnier et Salmon (4) ont remarqué également qu'un mélange de sucre et de bichromate de potasse, qui est hygroscopique dans les conditions ordinaires, perd cette propriété par l'influence lumineuse, de sorte que du carbone peut adhérer à la surface d'une feuille de papier recouverte de ce mélange avant l'influence lumineuse, et ne pas présenter d'adhérence après. Ils ont basé sur cet effet un moyen d'obtenir des épreuves positives. Pour opérer, ils font dissoudre 30 grammes de sucre blanc dans 30 grammes d'eau; après dissolution, ils ajoutent 7 grammes et demi de bichromate d'ammoniaque et 10 grammes d'albumine battue. La dissolution sert à recouvrir un papier qui, desséché et mis sous un cliché pendant un temps suffisant, est rapporté dans une chambre noire. On promène sur sa surface, à l'aide d'un blaireau, de la poudre de charbon, qui adhère de préférence sur les parties non altérées par la lumière. Des lavages à l'eau froide, puis à l'eau tiède,

(1) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, t. 4, p. 216.

(2) Davanne, *Annuaire photographique* pour 1868. — *Bulletin de la Société franç. de photogr.*, t. 14, p. 66, 1868.

(3) Poitevin, ouvrage cité, p. 174.

(4) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 5, p. 135.

enlèvent la couche non altérée, et une dissolution d'acide sulfureux décolore les parties altérées renfermant de l'oxyde hydraté de chrome. Quand le papier est sec, l'épreuve est obtenue. Mais par ce procédé les demi-teintes laissent à désirer, et les clairs retiennent presque toujours du carbone.

M. Poitevin (1), à l'aide d'une réaction du même ordre mais tout à fait différente, est parvenu à une autre méthode de formation d'épreuves positives inaltérables, qui ont l'avantage d'être obtenues sur papier ou de pouvoir être déposées sur verre, sur émail ou sur un support quelconque. Cette méthode est basée sur ce fait qu'un mélange de perchlorure de fer et d'acide tartrique, étendu sur du papier, n'est pas hygroscopique, mais qu'il le devient rapidement lorsque la lumière vient le frapper. C'est donc précisément l'effet contraire de celui qu'éprouve l'ammoniocitrate de fer, ainsi que le mélange de sucre et de bichromate d'ammoniaque ou de potasse dont il vient d'être question.

Pour opérer, on fait une dissolution de 110 grammes de perchlorure de fer ordinaire dans $\frac{1}{2}$ litre d'eau et une autre de 40 grammes d'acide tartrique dans la même quantité d'eau, puis on les mélange et on conserve le liquide obtenu dans l'obscurité. Ce liquide est étendu sur une lame de verre ou sur une glace tenue horizontalement ; quand la surface en est mouillée, on incline la glace et on la laisse sécher dans une pièce obscure bien sèche ; si cette pièce est échauffée, deux ou trois heures suffisent; dans le cas contraire, il faut une journée. Une fois desséchée ainsi à l'abri de la lumière, la couche amorphe forme un vernis sec et non hygroscopique. On place alors cette glace au-dessous d'un cliché, dans un châssis destiné au tirage des épreuves positives, et on expose le tout à la lumière pendant le temps nécessaire pour obtenir une épreuve positive ordinaire au chlorure d'argent.

Quand on retire la glace du châssis, on aperçoit le dessin se détachant en blanc sur le fond jaune du reste de la surface; on le laisse à l'abri de la lumière prendre la température ambiante, et il s'humecte aux dépens de l'eau atmosphérique dans toutes les parties qui ont reçu l'action de la lumière. On passe alors sur sa surface, à l'aide d'un pinceau très-doux, une poudre charbonneuse ou autre; on voit aussitôt apparaître le dessin, le charbon ou la matière pulvérulente très-divisée ne se fixant

(1) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 6, p. 212 et 304. — Poitevin, ouvrage déjà cité, p. 149.

que sur les endroits impressionnés, et en quantité à peu près proportionnelle à la quantité de lumière qui a traversé le cliché.

Lorsque l'épreuve est obtenue avec les précautions nécessaires, on peut la conserver ainsi en la vernissant. Si au lieu de charbon ou de couleur végétale on emploie des oxydes métalliques ou des émaux en poudre, on peut faire fondre dans une moufle ces corps colorants, et ils forment à la surface du verre un dessin inaltérable ; on opérerait de la même manière sur porcelaine. Pour avoir, dans ce cas, des noirs très-intenses, il faut faire usage de composés d'iridium.

Dans le cas où l'épreuve obtenue sur verre doit être reportée sur papier, on verse sur sa surface immédiatement après la fixation du carbone une couche de collodion, et on la baigne dans de l'eau légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique, pour enlever toute trace de sel de fer. On applique ensuite sur la surface collodionnée lavée et encore humide une feuille de papier, dont on établit le contact parfait avec le collodion au moyen d'un pinceau plat en blaireau. Si l'on veut que cette feuille de papier soit celle sur laquelle l'image doit rester, on s'arrange pour qu'elle soit gélatinée, et on la laisse sécher sur le verre ; l'épreuve se détache d'elle-même ; dans ce cas, l'image se trouve avoir le même sens que le négatif, ou être en sens inverse des objets. Lorsque l'on désire au contraire que l'épreuve positive au charbon soit dans le sens du modèle du cliché, le papier humide que l'on applique contre le collodion doit être du papier ordinaire, mais de dimensions un peu moindres que celles de la glace portant l'image ; on ramène tout autour, sur les bords de ce papier, les parties de la couche de collodion qui dépassent cette feuille, et on la soulève avec soin par l'un de ses coins ; elle emporte le collodion, ainsi que l'image, qui est ensuite appliquée sur une feuille de papier gélatiné un peu plus grande que celle qui a servi à enlever le dessin. L'image une fois desséchée se trouve alors dans le même sens que celui des objets qui ont donné le cliché négatif. Ces opérations se font avec facilité.

Il est facile de comprendre d'après cela comment à l'aide des différents principes énoncés dans ce paragraphe, ainsi que dans le précédent, on a pu obtenir des épreuves positives sur émail ou sur verre avec différentes substances vitrifiables (1).

(1) M. Lafon de Camarsac, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 40, p. 1266. —

§ 4. *Photographie des astres. Action des lumières artificielles.*

Les images de la lune et des planètes peuvent être aisément obtenues à l'aide des procédés photographiques qui viennent d'être décrits, et permettent d'étudier un grand nombre de questions scientifiques du plus haut intérêt.

On conçoit de quelle importance sont pour l'astronomie ces dessins qui représentent la position des astres pendant les éclipses ainsi que les effets lumineux qui les accompagnent, dessins qui permettent de transmettre, pour les conserver et les étudier, les images de ces phénomènes passagers qu'on était réduit à observer d'une manière fugitive.

Il est également important d'avoir des images des astres, qui, observés à des intervalles déterminés, servent à reconnaître quels sont les changements qui peuvent se produire sur leur surface ; déjà, par une étude attentive des taches du soleil, on sait que l'apparition de ces taches est un phénomène périodique, et au moyen des images photographiques obtenues à certaines périodes, et comparées entre elles, on aura des éléments utiles pour savoir quels sont les mouvements qui ont lieu dans la photosphère.

Parmi les savants et les astronomes qui se sont occupés de ces questions, et qui ont obtenu des images des astres, on peut citer en France MM. Foucault, Aimé Girard, en Italie le père Secchi, en Angleterre M. Warren de la Rue, et en Amérique M. Rutherfort (1). M. Warren de la Rue depuis plusieurs années s'est livré à ce genre de recherches ; il a fait élever un observatoire dans lequel un télescope à réflexion de 13 pouces d'ouverture (35 centim. environ), permet de prendre des épreuves photographiques des astres. Les images négatives de la lune obtenues à l'aide de cet appareil ont plusieurs centimètres de diamètre ; ensuite, avec des moyens d'amplification on peut obtenir des épreuves positives trois ou quatre fois plus grandes, ce qui permet d'en saisir beaucoup mieux les détails. Celles du soleil ont à peu près la même dimension ; les épreuves des planètes telles que Mars, Jupiter, Saturne sont également très-belles.

*Bullet. de la Société franç. de phot.*, t. 5, p. 241. — MM. Tessié du Motay et Maréchal, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 60, p. 1239. — *Bulletin de la Société franç. de phot.*, t. 11, p. 175. — Poitevin, ouvrage déjà cité.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 46, 47, 53, etc. — *Reports of brit. Assoc.* (1859), p. 152. — *Philosophical transactions*, t. 152, part. 1, page 383, etc.

M. Warren de la Rue à l'aide de ces impressions photographiques a pu réaliser une idée très-originale : la distance des planètes à la terre est telle que les images apparaissent toujours comme des figures plates sans relief. On ne pourrait appliquer là les principes de la stéréoscopie, car sur la surface terrestre on ne trouverait pas deux stations assez distantes pour donner l'angle visuel nécessaire afin que les deux épreuves photographiques produisissent la sensation de relief dans un stéréoscope. Mais au lieu de faire varier le point de vue il a fait varier, dans le même lieu, l'instant de l'observation de quelques heures ou de plusieurs mois, suivant les astres à représenter; pour la planète Mars, par exemple, deux heures donnent une rotation d'une trentaine de degrés; pour la lune la libration est telle qu'au bout d'un temps qu'on peut calculer, l'observateur la voit un peu plus de côté qu'elle ne se trouvait auparavant; deux épreuves étant ramenées à avoir la même dimension peuvent donc se trouver l'une par rapport à l'autre dans les mêmes conditions que deux épreuves stéréoscopiques ordinaires, et placées dans un stéréoscope donner la sensation de relief.

Dans ces diverses circonstances, la lumière active sur les substances impressionnables est la lumière solaire réfléchie par les planètes, et les conditions d'intensité seules règlent le temps nécessaire pour la production des épreuves, si l'on compare ce temps à celui qui est nécessaire pour la formation des images photographiques ordinaires. Quant aux lumières artificielles dont on peut se servir pour la production des images de la chambre noire, elles agissent non-seulement en raison de leur intensité, mais surtout en raison de leur composition et de la plus ou moins grande quantité de rayons très-réfrangibles qu'elles renferment; on a vu en effet dans le livre précédent, page 79 et suivantes, que les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui exercent l'action chimique la plus énergique pour colorer les sels d'argent. Il n'est donc pas nécessaire de revenir de nouveau sur ce sujet, et il suffira de rappeler ici que parmi les lumières artificielles dont on peut se servir avec avantage en photographie, on doit placer la lumière de l'arc voltaïque ainsi que celle qui résulte de la combustion du magnésium, et, dans quelques cas peut-être, la lumière provenant de la combustion du sulfure de carbone.

# CHAPITRE III.

## Gravure photographique et litho-photographie.

### § 1. *Gravure photographique.*

*Gravure par action des acides.* — On a vu dans le paragraphe Ier, page 168, que Nicéphore Niepce, dès le début de ses recherches photographiques sur le bitume de Judée, avait porté son attention sur l'application que l'on pouvait en faire à la reproduction photographique des gravures; en effet, le bitume de Judée dont étaient recouvertes les planches métalliques s'oxydait aux dépens de l'oxygène de l'air sous l'influence de la lumière, devenait insoluble ou plutôt moins soluble dans ses dissolvants ordinaires, et, formant les réserves, permettait de faire attaquer les planches métalliques par les acides. Les essais de gravure faits à cette époque montrent, par l'abscence des demi-teintes, que cette méthode s'appliquait principalement à la reproduction des gravures au trait.

M. Niepce de Saint-Victor (1) prépara la couche de bitume impressionnable, en dissolvant 2 pour 100 de cette substance dans un mélange de 9 parties de benzine et de 1 partie d'essence de citron, en déposant un peu de ce liquide à la surface de plaques d'acier, et en laissant évaporer les huiles essentielles; il reconnut à cette couche une plus grande sensibilité qu'au bitume étalé au rouleau, et fit, avec M. Lemaître, plusieurs planches gravées sur lesquelles le bitume, devant former réserve, était impressionné derrière une épreuve positive. Après le lavage dans un mélange de 5 parties d'huile de naphte pour 1 de benzine, ou d'un autre dissolvant, ils opéraient une première morsure à l'acide azotique étendu, puis ils couvraient la plaque d'acier d'un peu de poussière de résine (ce que l'on appelle en terme de graveur un grain de résine), après quoi ils continuaient à faire attaquer la plaque.

M. Ch. Nègre (2) a apporté à l'emploi du bitume de Judée des mo-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 36, p. 908 ; t. 37, p. 667; t. 39, p. 618 ; t. 40, p. 584.

(2) *Bulletin de la Société franç. de photogr.*, t. 2, p. 334 ; t. 3, p. 58 ; t. 13, page 40. — Rapport sur le prix fondé par M. le duc de Luynes, *Bulletin de la Société*, t. 13, p. 94.

difications importantes, qui lui ont permis d'obtenir des résultats remarquables; il se sert d'un cliché négatif, et une fois la couche de bitume impressionnée et lavée, les parties sur lesquelles le bitume reste correspondent aux lumières de l'épreuve négative, c'est-à-dire aux ombres de l'image, et doivent être creusées sur la plaque d'acier. Pour atteindre ce but, au moyen d'un courant électrique et d'une dissolution de double cyanure d'or et de potassium on dépose de l'or sur la surface d'acier, qui ne prend la dorure que sur les parties découvertes, parties qui doivent être préservées de l'action des acides; en outre, au lieu de former une réserve continue, le bitume se laisse pénétrer par la dissolution d'or, et il se forme une espèce de réseau, qui lors de l'action de l'acide donne ce que l'on nomme un grain sur l'image. Cette dorure étant faite, on enlève le bitume à l'aide d'essence de térébenthine ou de benzine, et l'on peut faire attaquer la planche après y avoir déposé encore par endroits de la poussière de résine si cela est nécessaire; les parties dorées forment les blancs de l'épreuve.

Cette méthode a donné, entre les mains de M. Ch. Nègre, de très-beaux spécimens de planches gravées. Une des difficultés que présente l'emploi du bitume comme substance photographique, vient de ce que cette matière n'acquiert pas une insolubilité absolue par l'influence lumineuse; elle n'est rendue que moins soluble dans les essences, et dans cet état les dissolvants du bitume finissent par l'enlever si l'action dure trop longtemps; c'est donc par l'habitude d'opérer que l'on peut arriver à laver rapidement la surface impressionnée de façon à laisser les réserves nécessaires.

Il faut parler maintenant des autres procédés de gravure qui ont été proposés, et qui s'ils n'ont pas donné des résultats pouvant être appliqués dans les arts présentent cependant des réactions intéressantes à connaître. Après la découverte de Daguerre, on songea aussitôt à graver sur la lame de plaqué d'argent l'image de la chambre noire qui était rendue avec tant de perfection, et plusieurs procédés furent successivement proposés. Parmi les personnes qui se sont occupées de ce sujet, on peut citer M. Donné, M. Grove, qui attaquait la plaque d'argent recouverte du dessin au pôle positif d'une pile, et M. Fizeau (1), dont le procédé consistait à faire mordre la plaque daguerrienne par l'eau régale (acide azotique additionné d'un chlorure ou d'acide chlorhydrique). Ce mé-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 16, p. 408; t. 19, p. 119.

ange attaque l'argent qui forme les noirs du dessin, tout en respectant les blancs composés d'amalgame d'argent. Après une première action de l'eau régale, M. Fizeau réservait la partie creusée et attaquée, au moyen d'une huile siccative, et recouvrait d'or les blancs par un dépôt électro-chimique ; ces parties réservées étaient alors plus résistantes, et l'on pouvait de nouveau creuser l'argent par l'action des acides. Ces planches d'argent ne pouvaient être soumises qu'à un tirage restreint, en raison du peu de résistance du métal ; on pourrait maintenant, par un dépôt de fer analogue à celui que l'on forme sur les plaques gravées, augmenter la dureté de la couche superficielle, et l'on obtiendrait un plus grand nombre d'épreuves.

M. Poitevin (1), en cherchant à reproduire par la gravure les images daguerriennes, observa plusieurs faits nouveaux, et entre autres le suivant : quand la lame de plaqué a été exposée à la vapeur de mercure et que le dessin est apparu, alors, sans dissoudre l'iodure d'argent non altéré, si l'on attache cette lame au pôle négatif d'une pile composée d'un petit nombre d'éléments, et qu'on la plonge dans un bain saturé de sulfate de cuivre en regard d'une plaque de cuivre, presque aussitôt le dépôt électro-chimique du cuivre a lieu, mais seulement sur les parties métalliques amalgamées, c'est-à-dire sur les blancs du dessin, et l'image apparaît en rouge par suite du dépôt cuivreux. Cette opération terminée, on lave la lame à l'hyposulfite de soude, on la chauffe pour oxyder le cuivre, et par des dépôts successifs d'or et de mercure on peut arriver à faire mordre certaines parties de la lame daguerrienne.

Ce dépôt galvanique de cuivre jouit également de propriétés dont l'observation a été pour M. Poitevin le germe des procédés de photolithographie dont il sera question plus loin. L'une consiste en ce qu'à la sortie du bain de sulfate de cuivre la plaque lavée et légèrement gommée, puis essuyée pour enlever l'excès de liquide, peut être encrée avec un rouleau chargé d'encre grasse ; le corps gras dans ce cas n'adhère qu'aux noirs du dessin, c'est-à-dire aux parties où existe la pellicule d'iodure d'argent qui les a préservés du dépôt de cuivre, tandis que cette encre n'adhère pas aux parties cuivrées. L'autre propriété consiste en ce que les plaques recouvertes du dépôt partiel de cuivre, que l'on oxyde ensuite, lorsqu'elles sont amalgamées dans les endroits où

(1) *Comptes rendus de l'Acad., des sciences*, t. 27, p. 13. — Poitevin, *Impression photographique sans sels d'argent*, p. 15.

l'argent est resté à nu, peuvent être encrées avec un rouleau chargé d'encre grasse : dans ce cas, l'encre ne prend que sur les parties où l'oxyde de cuivre existe, tandis que la surface de mercure n'en est pas mouillée.

M. Talbot (1), pour faire des gravures à l'eau-forte sur les plaques d'acier, a utilisé comme réserve sur ces plaques l'insolubilité que l'acide chromique communique aux matières gélatineuses sous l'influence de la lumière. Le procédé qu'il a donné consiste à recouvrir une plaque d'acier avec un mélange de gélatine et de bichromate de potasse; ce mélange une fois sec est impressionné au travers d'un cliché positif; les parties frappées par la lumière deviennent insolubles; après le lavage, on fait mordre la plaque avec du chlorure de platine ou de fer, et les réserves ne sont pas altérées. Mais ce procédé ne permet pas de creuser fortement la plaque, et quoique donnant des finesses de détails ne rend pas suffisamment les demi-teintes.

MM. Garnier et Salmon (2) ont indiqué les réactions suivantes comme pouvant donner des impressions de gravure : des lames de laiton iodurées, placées sous un cliché positif à l'influence de la lumière, donnent une impression qui est telle que si l'on promène sur la surface un tampon imbibé de mercure, les parties correspondantes aux clairs de l'épreuve refusent de s'amalgamer, celles au contraire qui correspondent aux parties opaques se dessinent en blanc par l'amalgame. Si l'on passe sur la plaque un rouleau d'encre grasse, le mercure ne prend pas l'encre, et celle-ci n'adhère que sur les parties influencées par la lumière, ce qui donne une épreuve encrée qui est inverse du modèle. Cette encre forme en même temps réserve, et on peut faire mordre la plaque de laiton par un acide. On peut, d'après MM. Garnier et Salmon, transformer cette plaque en planche lithographique en faisant suivre cette morsure d'un dépôt électro-chimique de fer : ce dépôt s'opère là où était l'amalgame; on enlève l'encre grasse formant réserve, le laiton est mis à nu, ioduré, puis amalgamé, et en passant le rouleau d'encre grasse, celle-ci ne s'attachant pas aux parties amalgamées, on peut obtenir des épreuves; mais ce procédé, curieux quant aux réactions observées, n'a pu donner de résultats satisfaisants que pour la reproduction des dessins au trait.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 36, p. 780, 1853. — *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 4, p. 317, et t. 13, p. 93.

(2) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 1, p. 80, et t. 13, p. 97.

On doit citer encore l'emploi de l'huile de lin lithargée comme donnant, d'après M. l'abbé Laborde (1), une substance photographiquement impressionnable qui, de même que le bitume de Judée, pourrait servir à former des planches gravées.

*Gravure par moulage. Helioplastie.* — Il y a des procédés de gravure photographique qui sont fondés sur d'autres effets que ceux résultant de l'action directe des acides sur les plaques métalliques pour les creuser inégalement et pour donner les différents tons de l'image à reproduire. On a vu dans le livre précédent, page 174, qu'en 1840 M. Ponton avait employé le bichromate de potasse pour préparer un papier sensible sur lequel les ombres des images étaient représentées par de l'oxyde hydraté de chrome. Peu de temps après (2), je fis usage de l'action exercée par la lumière sur l'acide chromique mélangé à l'amidon pour modifier cette dernière substance et lui enlever la propriété si connue de se colorer en bleu par l'iode. Ensuite, comme on vient de le voir, en 1853 M. Talbot utilisait l'action de l'acide chromique pour proposer le procédé de gravure dont il vient d'être question. En 1855 M. Poitevin (3) fit deux nouvelles applications de cette action de la lumière sur les mélanges de sels à base d'acide chromique et des matières gélatineuses ou gommeuses; l'une était relative au procédé de litho-photographie dont il sera question plus loin; l'autre concernait la production de gravures en relief ou en creux.

Ce procédé de gravure, nommé hélioplastie, repose sur la propriété qu'a la gélatine sèche et imprégnée d'un bichromate, de bichromate de potasse par exemple, étant soumise à l'action de la lumière de perdre la propriété de se gonfler dans l'eau, tandis que la gélatine ainsi préparée et non impressionnée s'y gonfle d'environ six fois son volume. On applique alors une couche plus ou moins épaisse de dissolution de gélatine sur une surface plane, de verre par exemple; on la laisse sécher, et on la plonge ensuite dans une dissolution d'un bichromate dont la base n'ait pas d'action sur la gélatine; on laisse sécher de nouveau la surface, et on impressionne la couche au travers d'un cliché photographique. Après l'impression, on plonge dans l'eau la couche de gélatine; toutes les parties qui n'ont pas reçu l'impression

(1) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 4, p. 213.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 469, 1840.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 20. — *Bulletin de la Société franc. de photographie*, t. 3, p. 65.

de la lumière se gonflent et forment des reliefs, tandis que celles qui ont été impressionnées, ne prenant pas d'eau, restent en creux. On transforme ensuite cette surface de gélatine présentant des reliefs et des creux, en planches métalliques en la moulant avec du plâtre, puis en déposant sur ce moule du cuivre métallique, ou bien en précipitant directement du cuivre par la galvanoplastie sur la surface de la gélatine préalablement rendue conductrice de l'électricité. Par ce procédé, les dessins négatifs au trait ont fourni à M. Poitevin des planches métalliques en relief destinées à l'impression typographique, tandis que les dessins positifs ont donné des planches en creux pouvant servir à l'impression en taille-douce.

A peu près à la même époque, M. Prestch (1) fit connaître une méthode qui au début était basée sur la réaction suivante : lorsqu'une couche de gélatine mélangée d'un bichromate soluble a reçu partiellement l'influence de la lumière, la partie non influencée se dissout dans l'eau tiède et disparaît, tandis que la partie influencée, devenue insoluble, résiste à l'action de l'eau tiède, et en se desséchant sur son support (lame de verre ou de métal), se solidifie et donne un relief; ce relief peut alors être moulé et transformé ainsi en contre-épreuve métallique. Plus tard, M. Presch s'est également servi du gonflement de la gélatine non altérée.

M. Placet (2) a fait usage des procédés précédents, et surtout du second, en lavant les épreuves non pas du côté où la lumière les a frappées, mais du côté opposé, et, ainsi que M. Fargier l'avait fait pour les épreuves au charbon (voir page 195), il a pu obtenir de cette manière des planches galvanoplastiques en relief et en creux qui présentent beaucoup de finesse.

M. Dulos a appliqué à la gravure photographique le procédé ingénieux qu'il a imaginé pour obtenir des planches gravées en relief ou en creux, et dont il fait usage depuis plusieurs années (3). Ce procédé consiste essentiellement à ne pas creuser les planches de cuivre ou d'acier à l'aide des acides ou par le burin, mais à obtenir des planches gravées par moulage galvanoplastique comme dans les diverses méthodes dont il vient d'être question. Le dessin à graver est fait, sur une lame de cuivre argentée, au moyen d'un crayon analogue au crayon

(1) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 2, p. 190; t. 4, p. 114; t. 15, p. 93 et suiv.

(2) *Id.*, t. 9, p. 328; t. 10, p. 68; t. 13, p. 105.

(3) *Rapport du jury international de l'exposition universelle de Londres de* 1862, t. 5, p. 400. — *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 36, p. 127. — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, t. 10, p. 184, et t. 11, p. 209.

lithographique ; en versant sur la surface de cette lame un amalgame ou un alliage fusible qui mouille les parties argentées et ne s'attache pas aux traits du dessin, on forme, après la solidification de l'amalgame ou de l'alliage, des reliefs et des creux dont la reproduction inverse est obtenue par un dépôt galvanique de cuivre ; les parties saillantes de ce dépôt correspondant aux traits du dessin, on a donc ainsi une planche typographique. On peut, par un procédé analogue, obtenir une planche gravée en creux à la manière des planches en taille-douce : après avoir fait le dessin sur la lame de cuivre argentée comme ci-dessus, on dépose électro-chimiquement du fer sur cette lame, le dépôt n'ayant lieu que là ou l'argent reste à nu ; on enlève le dessin au crayon à l'aide d'une huile essentielle, et l'amalgame ou l'alliage adhère aux parties argentées correspondantes aux traits du dessin, et laisse intactes les parties recouvertes de fer. On a alors par moulage galvanoplastique une planche en cuivre dont les creux correspondent aux traits du dessin. Ce procédé donne des gravures dont les demi-teintes et les traits ont une grande finesse.

M. Dulos a pensé que le dessin photographique pouvait remplacer le dessin au crayon, et en faisant usage des composés impressionnables d'argent ou de cuivre dont on a parlé antérieurement il a obtenu, à l'aide de clichés négatifs, des épreuves sur plaques d'argent ou de cuivre permettant aux amalgames ou aux alliages de donner des reliefs et des creux qui sont ensuite moulés par dépôt électro-chimique de cuivre. En déposant électro-chimiquement du fer sur la surface de ces plaques comme on le fait généralement aujourd'hui pour les gravures sur cuivre, ces plaques gravées ont pu tirer un très-grand nombre d'exemplaires sans s'altérer. On voit que cette méthode de gravure diffère des précédentes en ce que la gravure est obtenue non pas en attaquant la planche métallique, mais en se servant du dessin photographique comme d'un support pour produire, par action capillaire, une planche gravée en relief ou en creux.

### § 2. *Litho-photographie.*

Quelques essais de litho-photographie avaient été faits en 1852 (1) au moyen du bitume de Judée, dont une solution dans l'éther était appliquée sur une pierre lithographique ; après l'impression sous le cliché,

(1) Barreswil et Davanne, *Chimie photographique.*

la pierre était lavée dans l'éther, puis acidulée et gommée et recevait ensuite le rouleau d'encre grasse; les parties du bitume rendues insolubles par l'action de la lumière avaient formé réserves, et recevaient l'encre d'imprimerie. Mais la nécessité de faire usage de bains d'éther et les mêmes difficultés qui s'étaient présentées lors de l'emploi du bitume pour la gravure photographique se retrouvaient encore pour l'application de ce procédé.

On a vu précédemment, page 203, que M. Poitevin avait reconnu que l'encre grasse avait la possibilité d'adhérer aux parties insolées d'un mélange d'une matière gommeuse ou gélatineuse et d'acide chromique; dès lors il eut l'idée d'appliquer ces réactions aux pierres lithographiques et d'obtenir une impression des dessins photographiques analogue aux impressions ordinaires. En 1855 il réussit complétement à atteindre ce but (1). Voici en résumé comment il opère :

Le mélange qui réussit le mieux est un mélange à volumes égaux d'albumine, ou blanc d'œuf battu, et d'une dissolution saturée de bichromate de potasse. On applique avec un pinceau à vernir ce mélange sur la surface de la pierre lithographique préalablement lavée et séchée, puis, à l'aide d'un tampon de linge on enlève l'excès de la préparation. On soumet ensuite la surface de cette pierre à l'influence de la lumière sous un cliché négatif redressé du dessin à reproduire; cette exposition dure 15 ou 20 minutes, ou plus si la lumière active est faible. Cela fait, on rentre la pierre au laboratoire, on mouille sa surface avec une éponge, et l'on passe à plusieurs reprises le rouleau d'encre grasse; la surface de la pierre ne retient l'encre grasse que sur les parties modifiées par la lumière et devenues insolubles, les autres parties renfermant la matière gommeuse ou gélatineuse et restées solubles sont enlevées. Cette pierre est traitée par de l'acide faible, puis gommée et séchée comme une pierre lithographique ordinaire; on obtient donc ainsi des épreuves positives à l'encre d'impression, qui, soumises au tirage mécanique bien connu de la lithographie, fournissent autant d'épreuves qu'une pierre ordinaire.

Cette méthode est maintenant exploitée dans les ateliers de M. Lemercier; elle a l'avantage d'être très-simple et très-exacte dans ses résultats, aussi est-elle tout à fait industrielle. Un grand nombre de personnes l'ont mise en usage ou bien l'ont prise pour bases de procédés

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 20. — Poitevin, *Impression photogr. sans sels d'argent*, p. 76. — *Bulletin de la Soc. franc. de phot.*, t. 3, p. 42.

de tirage soit sur pierre, soit sur zinc ou sur un autre métal (1). Bien que des résultats très-remarquables de gravure par les différentes méthodes indiquées précédemment aient été présentés au concours pour le prix fondé par M. le duc de Luynes pour l'impression à l'encre grasse des épreuves photographiques, cependant la commission, d'un avis unanime, l'a décerné à M. Poitevin pour l'invention de son procédé de photo-lithographie, procédé qui permet d'obtenir sans retouches une épreuve photographique quelconque à un très-grand nombre d'exemplaires, comme avec une pierre lithographique ordinaire.

# CHAPITRE IV.

## Reproduction des couleurs par l'action de la lumière.

### § 1. *Préparation de la couche sensible. Sous-chlorure d'argent.*

Plusieurs observateurs avaient remarqué que le chlorure d'argent prenait différentes nuances suivant les circonstances de sa préparation, ou suivant la couleur de la lumière qui le frappe : Ainsi il paraît que Seebeck avait reconnu qu'il affectait une teinte rouge sous l'influence des rayons rouges; M. J. Herschell (2) avait observé que le papier sensitif de chlorure d'argent exposé à l'action d'un spectre fortement concentré recevait une impression telle, que le rouge était vif, mais d'une couleur se rapprochant du rouge brique, le jaune manquait, le vert était sombre et passait au noir; M. Hunt (3) avait aussi obtenu des teintes rougeâtres sur des papiers préparés à l'aide du chlorure d'argent.

On sait, d'un autre côté, que le chlorure d'argent ordinaire, coloré en violet à la lumière, prend, quand on le chauffe, un teinte rougeâtre tout à fait semblable à celle que l'on observe dans la partie rouge du spectre. On peut se demander si ce dernier effet n'est pas dû à l'action de la

(1) Voir l'énoncé de ces différentes méthodes, *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 13, page 85, rapport pour le concours du prix fondé par M. le duc de Luynes.
(2) *Athenæum*, 1839, n° 621. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 23, p. 185.
(3) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 26, p. 407.

chaleur; en tous cas, comme le chlorure d'argent ordinaire, quand il commence à se colorer, est légèrement violacé, que l'impression se manifeste d'abord dans la partie la plus réfrangible du spectre, et que, d'un autre côté, il prend une teinte rouge briquetée dans la partie la moins réfrangible, c'était une coïncidence assez curieuse que de voir les deux extrémités des impressions photogéniques du spectre sur le chlorure d'argent tourner l'une au violet dans le violet, l'autre au rouge dans le rouge prismatique.

J'ai commencé en 1838 et 1839 à m'occuper de ce sujet; j'avais pensé d'abord que l'effet de coloration produit dans la partie visible du spectre était dû à une action calorifique; mais depuis j'ai reconnu qu'il n'en était pas ainsi. Il faut examiner d'abord dans quelles conditions on doit se placer pour obtenir très-nettement ces effets. Si le chlorure d'argent n'est pas obtenu par double précipitation à la surface du papier, mais bien dans un verre à réactifs, et déposé sur un corps tel que du verre, de la porcelaine, du carton, etc., si ce chlorure n'a pas été exposé préalablement à la lumière, aussitôt que l'on projette le spectre solaire sur sa surface, il ne commence à s'impressionner que dans la partie ultra-violette, et on n'obtient qu'une teinte légèrement violacée, qui se fonce de plus en plus; d'un autre côté, il n'y a rien de produit dans la partie visible de l'image prismatique. Mais si on se sert de chlorure parfaitement pur et sans excès d'azotate d'argent, et que ce chlorure ait été primitivement impressionné, l'effet est très-appréciable : dans le violet, la teinte se fonce de plus en plus et est semblable à celle qui se serait produite à la lumière diffuse; mais dans la partie rouge on obtient une légère teinte rosée, et il n'y a aucun effet bien manifeste dans la partie jaune et verte, où l'on observe néanmoins une faible décoloration.

Si le chlorure est obtenu à la surface d'un papier plongé successivement dans l'eau salée, puis dans un bain d'azotate d'argent, et qu'il y ait un excès d'azotate d'argent, l'effet n'est pas le même : dans ce cas, ou bien la feuille de papier n'a pas été exposée préalablement à la lumière, et on n'a d'action chimique manifeste que dans la partie ultra-violette; ou bien le papier a été exposé au rayonnement, et il devient sensible même dans la partie visible du spectre depuis le bleu jusqu'au rouge; il y a alors une action de continuation qui a été étudiée dans le livre précédent, page 84, et les effets de coloration sont faibles, si toutefois ils sont observables.

J'ai pensé dès lors à préparer le chlorure d'argent directement en attaquant une lame d'argent par du chlore, soit gazeux, soit provenant

de la décomposition des chlorures (1). En exposant d'abord une lame d'argent à l'action du chlore gazeux, la lame est devenue blanche-grisâtre, et en projetant le spectre solaire sur sa surface, on n'a observé aucun phénomène bien net; seulement, une teinte grise s'est manifestée dans le violet et a signalé une réaction chimique. J'ai fait attaquer alors la lame d'argent par le chlore émanant de l'eau chlorée, ou, mieux encore, en la plongeant dans l'eau chlorée elle-même. La lame étant restée plongée dans le liquide pendant quelques instants, s'est recouverte d'une couche ayant une teinte grise-blanchâtre, et les actions de la lumière ont été bien différentes : après avoir projeté le spectre lumineux sur sa surface pendant quelques minutes, en retirant la lame et en l'examinant au jour, j'ai aperçu comme un *souvenir du spectre* fixé sur la lame et dont les nuances correspondaient exactement aux parties lumineuses de même couleur du spectre solaire; la place où le rouge avait frappé était rouge pâle, le jaune était jaune, le bleu, bleu, etc. En plaçant de nouveau la lame dans la même position et en laissant continuer pendant longtemps l'action du spectre, les effets ont disparu, et il est resté à la fin une teinte grise qui s'étendait sur toute la partie frappée par le spectre.

J'ai vu alors que ce n'était pas une simple coïncidence de teinte qui avait donné au chlorure d'argent préalablement impressionné la couleur rouge d'un côté du spectre et violette de l'autre, mais que dans ce cas le chlorure blanc non altéré était mélangé probablement de sous-chlorure, c'est-à-dire d'un chlorure ayant un équivalent de chlore de moins que le chlorure blanc, et que cette dernière substance donnait lieu aux teintes observées.

Alors à l'eau chlorée j'ai substitué des dissolutions de chlorures (bi-chlorure de cuivre, de fer, etc.), d'hypochlorites (hypochlorites de soude, de chaux, etc.), capables de céder du chlore à une lame d'argent, et j'ai obtenu, comme avec la première dissolution, des surfaces capables de reproduire l'image du spectre avec ses couleurs de manière à correspondre aux parties de même nuance du spectre réel. Une de celles qui ont donné les meilleurs résultats, et dont j'ai fait connaître la composition en 1848, est une dissolution contenant du bichlorure de cuivre. La préparation suivante est très-facile à obtenir : on prend du sulfate de cuivre du commerce et du chlorure de sodium; on met

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 22, p. 451 (1848). — *Id.*, t. 25, p. 447 (1849). — *Id.*, t. 42, p. 81.

ces deux sels en excès dans un verre à réactifs avec une certaine quantité d'eau ; la dissolution s'opère avec production d'une double réaction, et il se forme du bichlorure de cuivre ; on mélange un volume de ce liquide avec un volume d'une dissolution saturée de sel marin et six volumes d'eau : il suffit alors de plonger une plaque d'argent ou de plaqué d'argent dans ce liquide pour qu'elle prenne rapidement une teinte violette, due à la présence d'une légère couche de chlorure d'argent, et qu'elle devienne impressionnable à l'action du spectre, dont elle reproduit les nuances principales. Un autre chlorure, tel que le chlorure de potassium, de strontium, etc., substitué au chlorure de sodium donne les mêmes résultats, et la base du sel alcalin n'a aucune action sur le composé d'argent formé.

Les lames d'argent employées doivent être d'une très-grande pureté, et même préalablement chauffées jusqu'à 300 ou 400° si elles ont déjà servi à des expériences avec les vapeurs mercurielles, puis décapées avec soin, car ce procédé met en évidence les moindres traces de matières étrangères qui se trouveraient à leur surface.

Ce mode de préparation, quoique simple, ne permet pas d'augmenter à volonté l'épaisseur de la couche impressionnable ; aussi l'ai-je complétement abandonné pour y substituer un mode de préparation qui permet à la couche obtenue de donner des résultats bien autrement remarquables, et d'avoir telle épaisseur que l'on veut. Ce procédé consiste, comme on va le voir plus loin, à amener peu à peu à la surface des lames de plaqué, par l'action de l'électricité, du chlore à l'état naissant, qui attaque l'argent et donne la couche impressionnable.

On doit encore remarquer que bien qu'à l'aide de ces différentes méthodes de préparation on ne forme que des combinaisons de chlore et d'argent, cependant les surfaces impressionnables sont loin de présenter les mêmes effets sous l'influence de la lumière blanche. Presque toutes se colorent en gris ou en violet foncé à la lumière blanche, à l'exception de celle que l'on obtient immédiatement par l'action des bichlorures, et qui donne une impression blanche, ou du moins plus claire que le fond de la plaque ; en outre, le chlorure d'argent obtenu par ce dernier procédé est plus rapidement impressionné que s'il s'était préparé autrement, mais, comme on le verra, il ne donne pas toutes les couleurs du spectre lumineux.

Ces résultats montrent que la composition chimique de la substance sensible pouvant être la même dans ces diverses conditions, l'arrange-

ment moléculaire doit être différent, puisque j'ai reconnu que les effets ne sont pas indentiques. On verra plus loin qu'à l'aide de la chaleur ou de la lumière les plaques métalliques préparées de diverses manières peuvent être amenées dans des conditions analogues.

J'ai reconnu que quelle que soit la méthode employée il faut préparer rapidement la couche sensible, car en opérant lentement lors de l'action du spectre solaire sur la plaque, on voit une impression se produire au delà du violet, ce qui ne doit pas avoir lieu quand la surface est bien préparée. Cette circonstance vient à l'appui de cette opinion, que la couche formée est du sous-chlorure d'argent; car si le chlore a le temps d'agir de nouveau sur le sous-chlorure pour le transformer en chlorure ordinaire, il devient alors sensible aux rayons extrêmes du spectre comme le chlorure blanc obtenu par précipitation. Du reste, quand on plonge les lames dans une solution aqueuse d'ammoniaque et qu'on détruit la couche sensible, on trouve, même avant toute impression préalable de la lumière, que les lames cèdent du chlorure d'argent à l'ammoniaque, mais qu'il reste une poussière blanche à leur surface; il se produit donc une réaction analogue à celle qui se manifeste quand on traite par l'ammoniaque du chlorure blanc altéré par la lumière.

Pour préparer la couche impressionnable à l'aide des courants électriques, on commence par décaper et même par chauffer la lame de plaqué d'argent, ou la lame d'argent que l'on emploie, et on lui donne un poli parfait comme si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne; puis, fig. 59, on suspend cette lame MN, à l'aide de deux petits crochets en fil de cuivre, de façon à ce qu'elle puisse être plongée au milieu d'une masse liquide, et être enlevée à volonté au moyen du fil R qui est formé par la réunion des deux fils de cuivre. Le liquide dans lequel on

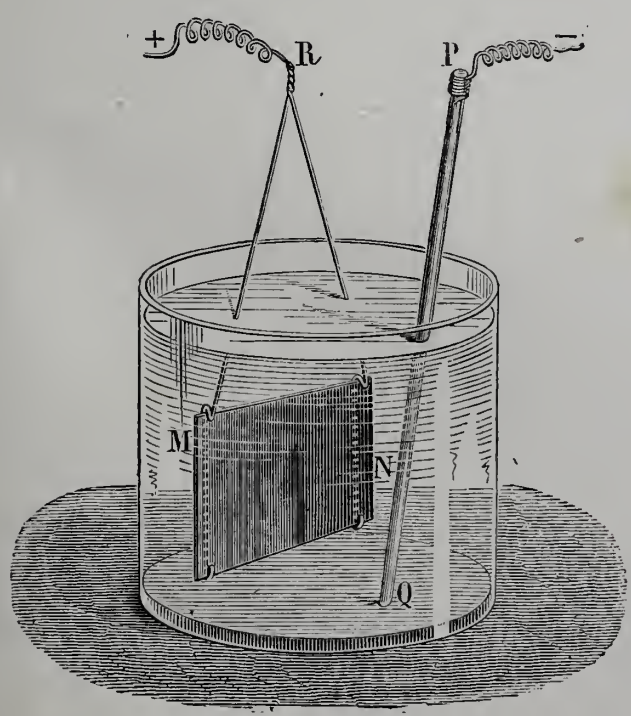


Fig. 59.

plonge la lame est de l'eau acidulée par de l'acide chlorhydrique, dans les proportions de 8 litres d'eau pour 1 litre d'acide ordinaire. On attache alors les fils de cuivre qui forment les supports en crochets de la lame, au pôle positif de la pile qui doit agir, et l'on plonge la lame au milieu de la dissolution au moment même d'opérer. La pile est formée d'un ou de plusieurs couples à acide azotique, suivant l'étendue de la lame et la disposition de l'appareil. Sans l'addition dont il va être question plus loin, si l'on opère avec des quarts de plaque daguerrienne ($10^c,6$ sur 8 centimètres), il faut un couple à acide azotique fortement chargé. Avec des demi-plaques, deux couples sont nécessaires, et même trois pour des plaques entières.

Lorsque la lame est dans le liquide, et se trouve maintenue verticalement, on plonge dans ce même bain un fil de cuivre ou de platine PQ en communication avec le pôle négatif des couples, afin de fermer le circuit voltaïque. On promène ce fil dans le liquide parallèlement à la surface argentée de la lame, et à 8 ou 10 centimètres de distance. Alors on voit des bulles d'hydrogène se détacher de ce fil, tandis que la surface d'argent se colore par suite du transport du chlore provenant de la décomposition de l'acide chlorhydrique. Si l'on promène le fil en face de la lame, la coloration de toute la surface est la même, et celle-ci change également de nuance dans tous les points; mais si l'on n'avait pas cette précaution, la surface sensible n'aurait pas partout la même épaisseur.

Les nuances qui se produisent sur la lame sont celles des lames minces ou des anneaux colorés vus par transmission, et sont analogues à celles des dépôts des oxydes métalliques à la surface des métaux. La surface de la lame commence à se colorer en gris, puis prend des teintes jaunâtres, violettes et vertes, qui se succèdent à mesure que le dépôt augmente d'épaisseur. Quand on veut se baser seulement sur la teinte du dépôt pour juger de son épaisseur, il faut opérer dans une pièce peu éclairée, retirer la lame d'argent du bain à différentes reprises, et s'arrêter à la teinte convenable, qui est en général du troisième, du quatrième ou du cinquième ordre, suivant les expériences que l'on a en vue, et ainsi qu'on le dira plus loin. Quand on a atteint le degré voulu, on lave la plaque à l'eau distillée, puis on la fait sécher en l'inclinant légèrement, et en la chauffant à l'aide d'une lampe à alcool, tout en insufflant de l'air à sa surface pour accélérer l'évaporation. On juge exactement de l'ordre de l'épaisseur de la couche impressionnable

en regardant la surface près du bord vers les points où les crochets en cuivre étaient attachés; on observe une suite d'anneaux colorés qui entourent ces points, se succèdent avec régularité, et viennent se fondre avec la nuance générale de la surface.

Si l'on examine la plaque à l'aide de la lumière d'une lampe, elle paraît recouverte d'une légère poussière blanchâtre, formant comme un faible voile. Pour l'enlever, on place cette plaque sur le cadre à polir, et on passe à différentes reprises à sa surface un polissoir en velours. Elle devient brillante, acquiert une teinte bois assez foncée, et est alors éminemment propre à recevoir les impressions colorées des différentes parties du rayonnement lumineux. Ce léger poli après le dépôt de la couche sensible est nécessaire pour donner de la vivacité aux nuances que l'on veut obtenir.

On peut rendre ce procédé d'une application facile et certaine en déterminant, dans chaque circonstance et à chaque instant, la quantité de chlore que l'on met à la surface de la lame d'argent. Pour cela, on interpose dans le circuit composé de la pile et du bain d'eau acidulée par l'acide chlorhydrique dans lequel plonge la lame attachée au pôle positif, un voltamètre à eau; de cette manière, le courant qui décompose l'acide chlorhydrique et transporte le chlore sur l'argent décompose aussi l'eau acidulée du voltamètre. Les décompositions électro-chimiques ayant lieu en proportions définies, il se porte autant de chlore en volume sur la surface de la lame d'argent qu'il se dégage de gaz hydrogène dans l'éprouvette placée au-dessus de l'électrode négative du voltamètre; si donc on recueille ce gaz, on voit à chaque instant à quel point en est la préparation. Pour opérer ainsi, il faut garantir avec un vernis le verso de la lame de plaqué, afin que le cuivre soit préservé et que l'argent métallique soit seul attaqué par le chlore provenant de la décomposition de l'acide chlorhydrique.

On a pu par ce moyen préparer les lames dans l'obscurité, et avoir des couches uniformes et d'une épaisseur déterminée. D'après cette addition d'un voltamètre, l'on peut dire que cette méthode de préparation est la seule qui puisse donner, dans des expériences de ce genre, des couches impressionnables identiques à elles-mêmes. Mais il est nécessaire, quand on opère ainsi, d'employer un plus grand nombre de couples que lorsqu'on ne se sert pas de voltamètre, et cela pour vaincre la résistance introduite dans le circuit. Ainsi, pour des lames dites quarts de plaque, il faut au moins trois couples à acide azotique fortement

chargés ; pour des demi-plaques et des plaques entières, quatre, cinq et même six couples. Pour les expériences courantes il est inutile, dans la mesure du gaz dégagé dans le voltamètre, de faire la correction de la pression, et de la tension de la vapeur d'eau ; il suffit de maintenir la température à 10 ou 12 degrés, et de disposer l'éprouvette graduée de façon à ce que le gaz hydrogène soit pris à la pression ordinaire, au moment où l'on observe son volume.

Il résulte des déterminations faites à l'aide de préparations opérées sur des surfaces d'argent de $10^{c},6$ sur 8 centimètres qu'en rapportant tout à l'unité de surface, et en évaluant le chlore d'après le volume de l'hydrogène du voltamètre déterminé en centimètres cubes, il faut par décimètre carré :

$2^{cc},80$ { de chlore pour que la teinte violette de la couche du deuxième ordre commence à paraître.

De $3^{cc},80$ à $3^{cc},90$ { pour la teinte violette du troisième ordre, donnant déjà de bonnnes impressions colorées.

De $6^{cc},50$ à $6^{cc},90$ { pour que la couche du quatrième ordre ait une épaisseur suffisante pour donner de belles reproductions des spectres lumineux.

Si l'on avait la densité exacte de ce chlorure, rien ne serait plus facile que de déduire des résultats précédents l'épaisseur de la couche impressionnable. Or, comme on ne connaît pas sa composition chimique, on ne peut faire que des suppositions à ce sujet. En admettant, par exemple, que la densité de ce chlorure soit la même que celle du chlorure blanc fondu, et que cette densité soit 5,277, on trouve que chaque centimètre cube de chlore donnerait sur 1 décimètre carré de surface d'argent une couche de chlorure d'une épaisseur de $\frac{1}{4120}$ de millimètre ; cela ferait pour l'épaisseur correspondant à 4 centimètres cubes, $\frac{1}{1030}$ de millimètre, et pour 7 centimètres cubes $\frac{1}{588}$ de millimètre. Mais, vu l'incertitude où l'on est sur la composition du corps impressionnable, on doit s'en tenir à la détermination de la quantité de matière d'après la proportion de chlore transportée sur la surface de la lame d'argent.

Je ferai remarquer que ce procédé se prêterait bien à la détermination de l'épaisseur des lames minces produites au moyen des actions électriques à la surface des plaques métalliques par l'oxyde de plomb, de manganèse, etc., suivant la méthode expérimentale découverte par mon père (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1 et 53 ; t. 18, p. 197. — Becquerel, *Traité d'électro-chimie*, 2me édit. (1864), p. 490.

En laissant le courant électrique agir plus longtemps qu'il vient d'être dit, la lame devient noire par suite d'une plus grande épaisseur de chlorure d'argent, mais ne donnerait pas d'aussi bons résultats sous l'action de la lumière. Il faut opérer entre les limites de 4 à 7 centimètres cubes de chlore par décimètre carré, suivant l'épaisseur de la couche dont on a besoin. Plus la couche est mince, plus la substance est impressionnable, mais aussi moins les nuances colorées sont belles. Les plaques préparées ainsi peuvent se conserver à l'abri de la lumière aussi longtemps que cela est nécessaire, et reçoivent toujours également bien les impressions lumineuses colorées.

On a vu plus haut que si l'on plongeait une lame d'argent dans une dissolution contenant des chlorures et capable de céder du chlore à l'argent, on avait une couche de sous-chlorure pouvant donner des impressions colorées; si l'on plonge dans ces liquides des papiers argentés, des lames de verre recouvertes de collodion dans lequel se trouve incorporé de l'argent réduit (préparées en exposant à la lumière le collodion contenant de l'azotate d'argent et en le traitant par un sel réducteur), on obtient également des surfaces qui jouissent de la même faculté; mais les effets sont moins beaux et bien moins complets que ceux que l'on peut obtenir avec des lames métalliques.

M. Poitevin (1), en partant de ces résultats, a cherché à obtenir également sur papier des images colorées. Il a mis le sous-chlorure d'argent violet en présence d'un sel oxygéné, et il lui a paru qu'il obtenait des résultats meilleurs que sans cette addition. Voici le procédé employé : du papier photographique étant préalablement recouvert d'une couche de sous-chlorure d'argent violet, obtenu par la réduction à la lumière du chlorure blanc en présence d'un sel réducteur (en général le protochlorure d'étain) et bien lavé, on applique sur sa surface un liquide formé par un mélange de 1 volume d'une dissolution de bichromate de potasse, de 1 volume d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre et de 1 volume d'une dissolution à 5 p. 100 de chlorure de potassium. On laisse sécher ce papier, et on le conserve à l'obscurité.

A l'aide de ce papier, on peut obtenir des épreuves du spectre lumineux avec ses nuances, mais moins belles que sur plaques; les teintes bleues et violettes surtout sont moins vives, mais les blancs dans les reproductions de tableaux colorés ou de peinture sur verre sont bien tran-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 1111 (1865).

chés. Ce papier n'est pas plus rapidement impressionnable ni plus stable à la lumière que les plaques préparées comme il a été dit plus haut; aussi je préfère leur emploi dans tous les cas : il facilite seulement l'obtention des images colorées, car la préparation est simple.

Le sous-chlorure d'argent violet est le seul corps chimiquement impressionnable qui, véritable rétine minérale, jouisse jusqu'ici de la propriété remarquable de reproduire les nuances des rayons lumineux actifs et de peindre avec la lumière. Les iodures, bromures, etc., d'argent ne donnent aucune couleur, et même il suffit que le chlorure soit mélangé d'un peu de ces composés pour que toute nuance disparaisse.

### § 2. *Modification produite par la chaleur et par les rayons infra-rouges sur la couche sensible.*

Une observation que j'ai faite dès le début de mes recherches a montré que l'on pouvait faire subir à la plaque recouverte de chlorure une préparation qui la place dans toutes autres conditions et montre combien sont grandes les modifications que l'on peut apporter à cette substance impressionnable si extraordinaire. Cette préparation consiste à recuire la lame, c'est-à-dire à élever sa température dans l'obscurité ou mieux dans une salle faiblement éclairée, afin de pouvoir juger de la transformation de la substance par ses changements de couleur. On place pour cela la lame préparée sur un petit trépied de 2 décimètres de hauteur, de façon à ce que la partie chlorurée soit au-dessus ; en promenant alors au-dessous de la lame la flamme d'une lampe à alcool, on échauffe cette lame graduellement et uniformément. On ne tarde pas à s'apercevoir, lorsque la température est voisine de 100°, que la couche sensible prend une teinte rosâtre; si l'on continue à chauffer, la couche devient rose, et quand on approche de la température rouge le chlorure fond et la surface impressionnable est détruite; il faut se garder d'atteindre ce point.

La lumière n'agit pas de la même manière sur cette plaque chauffée qu'avant de lui faire subir ce recuit. La lumière diffuse ou la lumière solaire directe agit en blanc sur la substance; en outre, les teintes des images colorées sont claires au lieu d'être sombres comme auparavant. Mais si d'un côté le recuit est avantageux, d'un autre il présente des inconvénients : avant l'élévation de température, les teintes jaunes, vertes, bleues, viennent bien sur les lames; après le

recuit, s'il a été trop élevé, les teintes jaunes et vertes sont beaucoup plus affaiblies et tournent au blanc ; il y a là un écueil à éviter : on a pu y remedier en opérant à une température beaucoup plus basse et prolongeant le temps du recuit.

Pour atteindre ce but on a employé une étuve à eau, chauffée à l'aide d'une lampe ou d'un bec de gaz, de telle sorte que l'on pût maintenir la température sensiblement constante pendant très-longtemps. On a vu alors qu'en maintenant la température de 30 à 35 degrés, et qu'en laissant les lames préparées exposées ainsi pendant plusieurs jours à l'action de la chaleur, la surface de ces lames change lentement de nuance, et l'effet a lieu comme à l'aide d'un recuit à plus haute température, mais avec de bien meilleurs résultats. En variant la durée de l'exposition des lames dans l'étuve, de trois ou quatre jours à six semaines, on a reconnu qu'après huit ou dix jours elles étaient dans un état convenable pour certaines expériences, surtout pour les reproductions des images colorées de la chambre noire.

Mais quelle est la nature de l'effet produit par une différence de température aussi faible soutenue pendant plusieurs jours sur le chlorure d'argent qui recouvre les lames? Il se manifeste probablement, dans cette circonstance, une modification dans l'état physique de la substance impressionnable, de façon que la lumière agit différemment sur elle ; ce serait alors une action du genre de celle qui se produit lors de la formation du phosphore rouge. Du reste, je dois dire que j'ai placé dans l'étuve des lames daguerriennes iodurées ordinaires, et qu'au bout de vingt-quatre heures, au lieu d'une couche d'iodure d'argent jaune d'or à la surface de la lame de plaqué, il s'est trouvé une couche blanchâtre indiquant une modification profonde de la matière sensible. Je n'ai pas cherché à constater les qualités de cette matière comme substance photogénique, puisqu'elle ne produit pas d'impressions colorées; mais je rapporte l'expérience pour montrer que l'iodure d'argent, comme le chlorure, éprouve une altération par suite d'une élévation de température très-faible, mais soutenue.

L'action de certaines parties du rayonnement solaire peut produire les mêmes effets que l'action de la chaleur. Quand on examine l'effet produit par les rayons rouges extrêmes du spectre sur les surfaces impressionnables, et, ainsi qu'on le verra plus loin, quand les lames ne sont pas recuites, elles prennent dans cette partie de l'image prismatique entre les raies noires B et A et au delà de A une couleur violette qui

fonce rapidement et tourne au noir. On peut facilement avoir un écran mixte formé par la réunion d'un verre rouge foncé (coloré par le protoxyde de cuivre) et d'un verre bleu foncé (coloré avec le cobalt), qui ne laisse passer que ces rayons extrêmes et qui donne aux lames la même teinte foncée. Lorsqu'on vient à placer sous un tel écran une plaque préparée à la pile, mais non recuite, et qu'on l'expose aux rayons solaires pendant une heure ou deux, suivant l'intensité lumineuse, ou bien à la lumière diffuse pendant un jour ou deux, on la retire colorée en violet foncé, ou même presque noire; en se servant alors de cette lame pour recevoir l'image du spectre ou de la chambre noire, on trouve ce résultat remarquable qu'elle donne des teintes claires sur un fond noir, et que la lumière blanche agit en blanc, non pas avec autant d'intensité qu'en recuisant les lames, mais néanmoins avec assez de netteté.

Ainsi l'action des rayons rouges extrêmes donne à la couche impressionnable de sous-chlorure violet les mêmes propriétés que la chaleur, mais avec cet avantage que le fond reste sombre, au lieu de passer au rose; en outre, les teintes jaunes et vertes viennent très-bien sur cette surface, ce qui n'a pas lieu par le simple recuit. On peut également faire subir d'abord cette dernière préparation à une plaque préparée, puis ensuite élever sa température, c'est-à-dire employer successivement ces deux actions physiques.

On va indiquer dans le paragraphe suivant quels sont les effets produits sur les surfaces préparées simplement à la pile, ainsi que sur les lames recuites, ou bien exposées à l'action des rayons rouges extrêmes sous un écran mixte semblable à celui dont il vient d'être question.

### §3. *Effets produits par les rayons différemment réfrangibles; spectre solaire, écrans incolores et écrans colorés.*

Le seul moyen d'étudier d'une manière exacte l'action des rayons différemment réfrangibles consiste à examiner les effets produits sous l'influence des diverses parties du spectre lumineux.

L'épaisseur de la couche impressionnable a une grande influence sur les résultats obtenus : trop mince ou trop épaisse, les couleurs des différentes parties du spectre laissent beaucoup à désirer. Le seul inconvénient qu'il y ait à opérer avec des couches d'une certaine épaisseur, c'est que plus la couche est épaisse plus l'action est lente à se manifester. Pour obtenir de bons effets, il faut préparer le chlorure dans l'obscurité,

de façon à mettre de 6cc,50 à 6cc,90 de chlore par décimètre carré de surface, c'est-à-dire à avoir une lame mince du quatrième ou du cinquième ordre des anneaux colorés.

Les plaques qui ont servi aux expériences avaient presque toujours, comme on l'a dit plus haut, 106 millimètres de longueur sur 80 millimètres de largeur. Le spectre était produit par un faisceau lumineux réfléchi sur la glace métallique d'un héliostat, se réfractant au travers d'un prisme de sulfure de carbone blanc, ou de flint blanc, puis traversant une lentille achromatique de 30 centimètres de foyer; il avait donc environ 80 millimètres de longueur sur 12 à 15 millimètres de largeur. Si l'ouverture du volet de la chambre noire est une fente mince d'un demi-millimètre de largeur, le spectre présente les raies noires bien marquées, mais alors il faut plusieurs heures d'action pour obtenir une belle reproduction photographique colorée du spectre lumineux. Si l'on veut hâter l'apparition de l'image du spectre, on donne à l'ouverture du volet une plus grande largeur, et l'action est plus rapide.

*Surfaces impressionnables non recuites.* — La partie de la lame qui commence à s'impressionner dans le spectre solaire est celle qui correspond au vert, au jaune, à l'orangé et au rouge, c'est-à-dire aux parties les plus lumineuses du spectre. Les points frappés par les rayons lumineux prennent des teintes qui correspondent à celles du spectre. En laissant continuer l'action, le bleu et le violet ne tardent pas à paraître, en même temps que les autres parties de l'impression prismatique prennent plus d'éclat. Seulement, la portion rouge de l'image qui correspond à la région située entre B et A, près de A, fonce rapidement et devient violet foncé ou plutôt d'une nuance amarante foncée ; cette coloration se continue même au delà de A, là où la rétine n'est plus impressionnée par la lumière. On juge des différentes teintes en arrêtant de temps en temps par un écran les rayons lumineux, et en examinant avec une lampe ou à l'aide de la lumière diffuse l'impression obtenue.

Au bout de plusieurs heures, si le spectre est peu intense, on a une très-belle reproduction du spectre lumineux avec toutes ses nuances : l'orangé, le vert, le bleu, le violet ont des tons très-vifs ; le rouge seul entre B et A est assez sombre. Sans cette teinte amarante ou puce foncée dans cette dernière région, on aurait la reproduction du spectre lumineux avec ses nuances correspondantes aux rayons actifs ; mais on doit remarquer qu'au commencement de l'action, dans les points où la teinte amarante foncée apparaît ensuite, vers le rouge extrême et au delà, l'im-

pression est rouge et de même nuance que celle du rouge du spectre.

Pour bien juger des tons jaunes, orangés et verts, il faut dilater le spectre. On opère alors en réfractant la lumière au travers de deux prismes placés l'un après l'autre, et l'on peut ainsi étaler à volonté les différentes parties de l'image prismatique. On voit de cette manière que les teintes obtenues sur les lames préparées comme je l'ai dit sont semblables à celles du spectre lumineux. La comparaison des nuances est très-difficile à faire, cependant je puis citer l'expérience suivante comme étant assez facile à répéter : après avoir obtenu une bonne impression colorée du spectre, on isole chaque portion successivement, et l'on promène ces espaces différemment colorés dans le spectre lumineux; on voit alors que cette portion paraît plus brillante dans la partie du spectre qui l'a produite que dans toute autre : ce qui montre bien que les rayons de même réfrangibilité que ceux qui ont donné lieu à cet effet sont réfléchis en plus grande abondance que les autres.

Si on laissait la plaque exposée au spectre pendant un temps plus long que celui qui a été indiqué, une teinte grise commencerait à se montrer dans le jaune et le vert, puis gagnerait peu à peu les autres parties du spectre à mesure que l'action se continuerait, et l'on finirait par avoir une impression monochromatique provenant de la décomposition complète de la substance impressionnable dans toute l'étendue du spectre. C'est donc lors du passage d'un état à un autre de la matière impressionnable que chaque rayon imprime sa couleur à cette matière; et lorsque la transformation chimique que les rayons provoquent est entièrement terminée, les couleurs ont disparu.

On peut remarquer dans ces images photographiques colorées du spectre solaire que l'action se limite à l'extrême violet visible et ne s'étend pas beaucoup au delà de H. Dans mes premiers travaux, la méthode de préparation ne m'avait pas permis d'atteindre ce but, et il se manifestait une action dans cette région. Ce résultat paraît tenir à ce que la préparation électro-chimique du composé sensible ayant lieu rapidement, on évite la formation du chlorure blanc, qui est impressionné au delà du violet.

Si l'on opère à l'aide d'une petite ouverture du volet de la chambre noire, on sait que l'image du spectre donne bien nettement les raies, mais les impressions photographiques colorées, à l'exception des grosses raies H, G, F, A, ne les présentent pas. Cet effet tient peut-être à une espèce

d'irradiation qui fait que sur le chlorure impressionné par la lumière l'action ne se limite pas exactement aux points frappés et gagne un peu les parties voisines, à mesure que l'impression se produit et que l'on prolonge la durée de l'expérience.

*Surfaces impressionnables recuites.* — Le recuit des lames, comme il a été dit plus haut, a pour effet de donner des surfaces sensibles qui reçoivent des impressions des spectres lumineux présentant des teintes plus claires que le ton général formant le fond de la plaque ; mais en même temps les couleurs jaunes et vertes sont moins marquées, tandis que les couleurs rouges, bleues et violettes ont des nuances aussi belles. Si la lame a été peu chauffée, et que la surface ait seulement une teinte bois, c'est-à-dire un peu rougeâtre, alors le spectre s'imprime bien avec toutes ses couleurs ; le jaune se marque ainsi que le vert ; le bleu et le violet deviennent superbes ; l'orangé se peint bien et le rouge aussi, mais toujours au delà de la raie A, à l'extrême rouge, la couleur amarante ou puce se produit, et cette portion de l'image finit même par acquérir une teinte presque noire. Quant à l'impression qui tend à se manifester au delà du violet, elle est en général plus faible. La lumière blanche donne seulement une teinte grise, et non pas un beau blanc comme si le recuit eût été fait à une température plus élevée.

Lorsqu'on opère avec des lames chauffées davantage, l'image du spectre devient plus claire ; mais aussi les diverses nuances colorées disparaissent de plus en plus. Si la couche sensible est rose, l'image prismatique ne présente plus de bien distinctes que les couleurs rouges, bleues et violettes : le vert et le jaune se marquent en blanc légèrement jaunâtre, mais la lumière blanche agit en donnant une belle teinte blanche, et la couleur puce ou amarante à l'extrême rouge n'est plus sensible.

Enfin, si la plaque a été chauffée jusqu'au commencement de fusion du chlorure d'argent, alors l'image se détache en blanc jaunâtre sur un fond rougeâtre plus sombre et n'est colorée qu'à ses extrémités, d'un côté en bleu tournant au violet, de l'autre au rouge. Les teintes intermédiaires ont disparu et sont remplacées par une nuance blanche légèrement jaunâtre.

Ainsi à mesure que la substance impressionnable est recuite à une température plus élevée, les teintes vertes, jaunes et orangées, c'est-à-dire les parties centrales de l'image prismatique s'impriment en blanc. Mais si l'on se borne à placer les lames pendant quelques jours

dans l'étuve chauffée de 27 à 30 degrés, on évite en partie cette extinction des couleurs vertes et jaunes lors de l'action du spectre, et d'un autre côté l'on diminue beaucoup la teinte foncée qui se produit entre B et A, et qui se prolonge au delà du rouge extrême A.

*Surfaces impressionnables soumises à l'action des rayons rouges extrêmes.* — D'après ce que l'on a vu dans le paragraphe précédent l'action exercée par les rayons les moins réfrangibles de la lumière est très-remarquable en ce qu'elle conduit à un résultat analogue à celui que l'on obtient en élevant la température des lames. Il semble donc que dans l'un et l'autre cas une modification physique du même ordre se manifeste ; et cela est d'autant plus curieux que la partie du spectre où ce phénomène se produit est précisément celle où se trouve le maximum de chaleur : mais dans ces expériences l'élévation de température des lames dans le rouge extrême n'est pas appréciable, et l'effet est produit par une action particulière de cette portion du rayonnement lumineux.

Le spectre solaire impressionne vivement la surface ainsi modifiée par une exposition préalable aux rayons solaires sous un écran mixte formé par des verres rouge et bleu, écran qui ne laisse passer que le rouge extrême du spectre. L'action commence, comme précédemment, dans l'orangé, le jaune et le vert ; elle s'étend peu à peu et plus lentement vers le bleu et le violet d'un côté, puis vers le rouge de l'autre. Toutes les teintes sont claires comme si les lames eussent été recuites, à l'exception du bleu extrême et du violet, si l'action des rayons rouges a été trop prolongée; mais l'impression prismatique est beaucoup plus belle, en ce cens que le vert, le jaune et l'orangé ont des nuances plus vives qu'avant l'action des rayons rouges extrêmes. Ainsi, à l'avantage que possède le chlorure modifié par les rayons les moins réfrangibles sur celui qui a subi le recuit, de donner un fond noir sur lequel viennent se peindre les différentes nuances prismatiques, se joint celui de conserver les teintes vertes et jaunes.

Du côté du rouge, l'image du spectre ne donne une teinte brillante que jusqu'en B; à partir de cette ligne, la teinte foncée qui se serait produite, étant celle qui domine sur toute la surface, aucun effet n'a lieu dans les premiers instants; cependant, si primitivement le chlorure n'a séjourné qu'un temps insuffisant sous l'écran mixte qui ne laisse passer que le rouge extrême, le spectre solaire donne encore une impression foncée au delà de B et de A. Si l'action de l'écran a été

suffisamment prolongée, alors l'action du spectre se limite vers B, peut-être un peu au delà, et s'étend à peine jusqu'à A; dans ce cas, l'impression colorée que reçoit le chlorure est d'une longueur un peu moindre que celle du spectre lumineux lui-même. On peut dire que si cette teinte noire du rouge extrême ne se produisait pas, ce mode de préparation du chlorure permettrait de rendre le mieux possible les différentes teintes des rayons lumineux agissant sur la surface impressionnable.

*Écrans incolores et colorés.* — On a vu dans le livre précédent quelle était l'action des écrans incolores et colorés sur les matières impressionnables, et ce qui a été dit sur ce sujet s'applique au sous-chlorure d'argent, que l'on étudie dans ce chapitre. Ainsi les écrans incolores et transparents ne peuvent avoir d'action absorbante énergique que sur les rayons dont la réfrangibilité est moindre que le rouge ou plus grande que le violet, et laissent passer avec une égale intensité les rayons compris entre les réfrangibilités extrêmes A et H du rouge et du violet. Or, comme la matière impressionnable dont il est question ici donne les impressions colorées du spectre dans les parties correspondantes aux couleurs des rayons actifs, entre ces limites l'interposition d'un écran incolore et transparent sur la route des rayons, avant ou après leur réfraction, ne change pas les impressions prismatiques; c'est ce que l'expérience vérifie.

Mais on vient de voir qu'en outre de cette action on pouvait observer sur les lames des traces de coloration au delà du violet, et une teinte amarante au delà du rouge surtout si le recuit n'est pas suffisant; les écrans transparents pourront donc, suivant leur nature, agir sur les rayons ultra-violets et infra-rouges et même les absorber : un écran liquide de bisulfate de quinine, par exemple, mis sur la route d'un faisceau de rayons solaires avant sa réfraction arrête toute action à partir de H, et l'image du spectre obtenu se limite aux raies A et H. L'action remarquable de cet écran est très-précieuse, dans certains cas, pour la reproduction des images colorées de la chambre noire; en effet, grâce à l'absorption que ce liquide fait éprouver aux rayons ultra-violets, la matière sensible n'est alors impressionnée qu'entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine.

Il y a d'autres liquides, comme on l'a vu page 105, qui partagent avec la dissolution de bisulfate de quinine la propriété précédente, mais à un degré moindre; ce sont la créosote, l'essence d'amandes

amères, etc. Parmi les solides, la dichroïte jouit aussi de cette faculté.

Dans certains cas, il serait nécessaire que l'on pût enlever la portion du rayonnement située au delà du rouge A, et qui agit en noircissant fortement les plaques; mais il n'y a pas d'écran incolore jouissant exclusivement de cette propriété; on peut bien s'opposer à l'action de la partie infra-rouge du spectre, mais on absorbe également une portion de l'extrême rouge. Il suffit pour cela de placer sur la route des rayons lumineux un écran liquide formé par une faible dissolution de sulfate de cuivre; une dissolution de 1 partie de sulfate de cuivre pour 100 d'eau, et qui est à peine colorée, donne lieu à cet effet. Les sels de cuivre jouissent, comme on le sait, de la faculté d'arrêter les rayons rouges extrêmes, tandis que d'autres écrans bleus, comme le verre bleu de cobalt, laissent passer la partie BA du spectre lumineux.

A l'aide du recuit, ainsi qu'on l'a vu plus haut, on peut également diminuer beaucoup cette action et quelquefois la faire disparaître.

La matière impressionnable se colorant dans le spectre de toutes les nuances de cette image, les écrans colorés, tels que les verres colorés, doivent imprimer leur couleur à cette matière lorsqu'on l'expose, sous ces verres, à l'action de la lumière diffuse ou solaire. Mais il est certaines précautions à prendre pour qu'il en soit ainsi : d'abord quand on se sert d'une plaque qui n'a pas été recuite, la lumière blanche donnant une teinte violette plus ou moins foncée, cette couleur, avec certains écrans, se mêle à la teinte produite par le verre coloré et masque la coloration que l'on doit observer. Il est donc nécessaire d'agir avec des plaques recuites convenablement, et même de placer sur les verres colorés un écran liquide incolore de bisulfate de quinine ou bien un de ceux qui ont été cités plus haut, afin que les rayons actifs plus réfrangibles que les rayons violets H ne viennent pas compliquer l'action.

On conçoit en effet qu'il soit bien plus important dans cette circonstance, qu'en prenant des impressions de spectre, de se servir de ces écrans, qui absorbent la partie ultra-violette de l'image prismatique; car dans le spectre la coloration grise est rejetée en dehors du violet, tandis que sous les verres colorés cet effet particulier se mêle à l'effet de coloration que l'on veut observer.

Les difficultés que l'on rencontre pour obtenir toutes les nuances des verres colorés sur les plaques recuites, et produire en même temps

une teinte blanche sous un verre blanc, sont les mêmes que celles qui ont été signalées précédemment à propos des impressions prismatiques : si la plaque est trop recuite, le verre blanc donne une image très-blanche ; mais les verres jaunes et verts produisent une impression jaunâtre. Si elle ne l'est que peu, les verres jaunes et verts donnent des impressions colorées comme leurs nuances ; mais le verre rouge produit une teinte amarante foncée, en raison de l'action des rayons rouges extrêmes, et le verre blanc donne une couleur grise.

Cependant, avec un peu de soin, on peut préparer une plaque qui reproduit assez bien les diverses nuances des verres colorés ; seulement, il ne faut pas s'attendre à avoir des couleurs comparables à celles que l'on obtient à l'aquarelle sur papier. Les teintes observées sont légères, mais assez visibles pour que des personnes habituées aux phénomènes d'optique puissent bien les apprécier.

Il est très-intéressant de reconnaître que non-seulement les rayons simples donnent leur nuance à la matière sensible, mais encore que la réunion de plusieurs d'entre eux la colore de la teinte qui résulte de leur mélange. On peut du reste se convaincre qu'il en est réellement ainsi ; il suffit de placer sur la route d'un faisceau de rayons solaires le verre coloré que l'on examine, avant de réfracter ce faisceau dans un prisme, et de recevoir sur la matière impressionnable le spectre produit par les rayons qui ont traversé ce verre : le spectre est alors composé de zones lumineuses plus ou moins séparées par des bandes obscures, et se reproduit exactement sur la plaque préparée, sauf les effets signalés plus haut et dépendant de la préparation de la matière elle-même. Ainsi le verre bleu coloré par le cobalt, s'il n'est pas trop foncé, présente un spectre interrompu par trois grandes bandes noires, placées l'une entre le rouge et l'orangé, la seconde entre l'orangé et le vert, et la troisième entre le vert et le bleu ; si le verre était foncé, on ne verrait que deux taches lumineuses, l'une rouge, l'autre bleue et violette. En recevant sur une plaque préparée ce spectre interrompu, on trouve, au bout d'un temps qui dépend de l'intensité lumineuse, que l'image obtenue est la reproduction du spectre lumineux avec les espaces obscurs dans lesquels la plaque a conservé sa teinte propre.

Ce résultat, joint à la reproduction des raies principales du spectre, montre que du moment que les rayons lumineux d'une partie du spectre sont absorbés, toute action cesse sur la matière qui nous occupe ici, comme sur toutes les substances sensibles citées antérieure-

ment ; c'est une conséquence de l'unité de rayonnement comme on l'a déjà répété à plusieurs reprises dans cet ouvrage. Si les raies fines du spectre n'ont pas été reproduites de même qu'en faisant usage de l'iodure d'argent, cela tient probablement à une irradiation causée par l'épaisseur de la couche impressionnable.

### § 4. *Reproduction des images colorées de la chambre noire ainsi que des estampes coloriées.*

Si les différentes teintes du spectre lumineux sont reproduites sur le chlorure d'argent violet préparé avec toutes les précautions qui ont été indiquées, et si, d'un autre côté, la lumière blanche donne lieu à une impression blanche, les différentes teintes composées doivent donner des impressions de même couleur qu'elles. On obtient en effet facilement les images que produit la lumière polarisée en traversant les cristaux, les anneaux colorés, les franges d'interférences, etc. ; il suffit pour cela de projeter ces images sur des plaques semblables à celles qui ont servi aux expériences précédentes. Ce résultat se conçoit aisément, puisque les actions sont limitées aux extrémités visibles du spectre, et que les teintes des images obtenues sont analogues à celles des rayons actifs, simples ou mélangés.

Les anneaux colorés sont en même nombre et de mêmes nuances que ceux vus par projection. Cet effet n'a pas lieu, abstraction faite de la couleur, bien entendu, quand on opère avec d'autres substances impressionnables : en général, celles-ci sont sensibles entre d'autres limites de réfrangibilité que celles des rayons extrêmes qui agissent sur la rétine, et peuvent présenter alors des anneaux, des franges appartenant à des rayons principalement situés au delà du violet. Les effets obtenus avec le sous-chlorure d'argent tiennent à ce que ce composé, bien préparé, n'est sensible qu'entre les limites du violet et du rouge.

La question de la reproduction des images colorées de la chambre noire, ou, si l'on veut, le problème de peindre avec la lumière, m'a préoccupé dès mes premières recherches, et les essais tentés ont montré que ce but n'était pas impossible à atteindre. En 1848 (1), j'ai montré qu'en plaçant les plaques impressionnables au foyer d'une chambre obs-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 26, p 181, et t. 27, p. 485. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 22, p. 451.

cure, on pouvait avoir des impressions colorées représentant en partie les nuances de l'image. Mais du moment que les modifications dans la préparation ont donné une plus grande vivacité aux teintes produites par les rayons de différentes couleurs, il était évident que les images colorées seraient obtenues avec plus de netteté qu'auparavant. J'ai fait ainsi plusieurs reproductions; mais je dois signaler les causes qui se sont opposées à ce que les images soient comparativement aussi nettes que les épreuves si vives du spectre lumineux et des anneaux colorés.

D'abord les surfaces d'argent qui présentent le mieux les nuances des rayons différemment réfrangibles ont de 4 à 7 centimètres cubes de chlore par décimètre carré, et ont été soumises à l'action des rayons rouges extrêmes; le chlorure ainsi préparé est encore sensible aux rayons extrêmes rouges, et la lumière blanche donne une impression d'une teinte grise. Dans les images de la chambre noire, on a des teintes composées, plus ou moins mélangées de blanc; il est donc nécessaire que l'action de la lumière blanche ne vienne pas changer la nuance des rayons colorés dont la teinte est prédominante. Or, c'est ce qui n'a pas lieu dans ce cas; pour obtenir ce résultat il faut soumettre les plaques au recuit, et alors les clairs sont bien nettement obtenus.

On ne doit pas faire cette opération sans précautions, et il est nécessaire de suivre les indications données précédemment; sans cela, les teintes jaunes et vertes ne viennent pas. Si le recuit est lent, on peut avoir d'assez bonnes reproductions d'images colorées à la chambre noire; mais si l'on parvenait à préparer le sous-chlorure impressionnable de manière à ce que la lumière blanche pût agir aussi vivement et donnât la même impression blanche sur le chlorure non recuit que sur celui qui l'a été, on aurait des impressions colorées ayant des teintes aussi belles que celles du spectre solaire. On peut encore modifier la surface sensible à l'aide des rayons infra-rouges comme il a été dit page 219, et on arrive également à de bons résultats.

Un autre inconvénient s'oppose à la facile reproduction des images de la chambre noire : c'est le peu de rapidité avec laquelle le chlorure s'impressionne. Il faut éclairer vivement à l'aide des rayons solaires les objets que l'on veut reproduire, et malgré cette précaution il est nécessaire de prolonger l'exposition de la surface impressionnable au foyer de la chambre noire pendant plusieurs heures; quand on agit à la lumière diffuse, il faut un temps beaucoup plus long.

Si l'on applique sur une lame impressionnable une estampe coloriée de façon à ce que la partie peinte soit en contact avec la lame, que l'on presse l'estampe sur la plaque à l'aide d'une lame de verre, puis qu'on expose le tout à la lumière solaire ou diffuse, après un temps plus ou moins long, qui dépendra de l'intensité lumineuse et de l'épaisseur du papier de l'estampe, on trouvera celle-ci reproduite photographiquement avec ses couleurs sur la lame.

Mais ici il se présente les mêmes inconvénients que ceux qui viennent d'être signalés à propos des verres colorés; en même temps que les rayons compris entre le rouge et le violet, il peut passer, par transparence, au travers du papier des rayons infra-rouges et ultra-violets ou même de la lumière diffuse, de sorte que suivant les conditions de préparation de la surface impressionnable, et suivant les matières colorantes des estampes agissant comme écrans colorés, la reproduction des couleurs est plus ou moins bonne. Quelquefois même des couleurs foncées et presque noires donnent lieu à une impression noire, en raison du passage des rayons extrêmes qui impressionnent la surface, mais qui n'agissant pas sur la rétine ne sont pas appréciables pour les observateurs. Dans ce cas, il semble que les tons noirs soient reproduits photographiquement par des noirs; ce résultat, dont on se rend aisément compte, montre qu'il ne faut pas juger l'impression qui peut être produite sur une surface impressionnable d'après l'effet optique qu'un faisceau des rayons exerce sur la rétine, ces effets pouvant être différents même avec cette matière.

Quand on cherche à reproduire par décalcage les estampes coloriées, les couleurs vives se marquent seules d'une manière satisfaisante et les teintes pâles n'apparaissent que très-légèrement; on doit remarquer en effet que par ce procédé les couleurs transmises par l'estampe ne sont pas très-vives, et que la lumière diffuse pénètre à travers le papier et agit sur la plaque.

Pour avoir des blancs bien marqués il est nécessaire, comme pour la reproduction des images colorées de la chambre noire, de faire subir un recuit préalable aux plaques. Mais si le recuit est trop fort, les couleurs telles que le rouge, le bleu, le bistre, le violet, paraissent seules, et les jaunes et les verts sont à peine sensibles; si au contraire les plaques ne sont pas recuites, les jaunes et les verts deviennent apparents, mais le blanc ne se produit plus. Il faut donc se borner à un faible recuit ou à un recuit à plus basse température, comme on l'a

vu page 219, et risquer d'avoir des blancs plus ternes afin de faire venir en même temps les différentes couleurs. On peut même placer sur le verre qui couvre l'estampe une bouteille plate en verre bien transparent, remplie d'une solution de bisulfate de quinine à laquelle on peut ajouter une petite quantité de sulfate de cuivre; cet écran enlève alors les rayons ultra-violets ainsi que les rayons infra-rouges. Par cette addition, les blancs sont plus beaux.

Les peintures sur verre peuvent se reproduire sur les plaques par transparence, mais plus difficilement que les estampes en raison des causes d'erreur dues aux rayons extrêmes ainsi qu'on l'a expliqué plus haut à propos de l'emploi des verres colorés.

On peut également obtenir des estampes par décalcage sur papier, et l'on a décrit, page 217, une préparation qui permet d'atteindre ce but; mais avec le sous-chlorure formé sur le papier, jusqu'ici les reproductions, quoique faites avec facilité, ont donné des teintes moins belles et moins vives que sur plaques et sont aussi altérables (1).

### § 5. *Altération à la lumière des images photographiques colorées produites sur le sous-chlorure d'argent.*

Les images photographiques colorées du spectre et celles de la chambre obscure, une fois produites, peuvent se conserver indéfiniment dans l'obscurité; mais elles s'altèrent à la lumière, et le sous-chlorure d'argent continue à s'impressionner suivant la couleur des rayons avec lesquels on l'éclaire. Si l'on met une de ces images sous un verre rouge ou sous un verre bleu, l'image devient d'abord rouge ou bleue, pour disparaître par une action lumineuse prolongée en prenant un ton grisâtre plus ou moins foncé dans lequel on ne distingue plus aucune nuance.

Si on plonge une lame recouverte d'une image colorée du spectre ou de la chambre noire dans un des dissolvants du chlorure d'argent blanc, tel qu'une dissolution d'ammoniaque, d'hyposulfite de soude, de

(1) M. Niepce de Saint-Victor a préparé sur plaqué d'argent, depuis 1851, des reproductions d'estampes coloriées ou d'images de la chambre noire, d'après le premier procédé que j'avais découvert dès 1848; mais, cette méthode de préparation par immersion donnant des teintes moins vives que celle qui résulte de l'emploi des courants électriques, et les résultats qu'il a cités, et qui peuvent se rapporter à ce sujet, ne me paraissant pas différer notablement de ceux qui ont été indiqués précédemment et que j'avais obtenus antérieurement, il ne me paraît pas nécessaire de les mentionner (Voir *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 52, p. 834 (1851); t. 54, p. 215; t. 55, p. 694 et 698; et *Bullet. de la Société franç. de photographie.*

chlorure de sodium on de chlorures alcalins, toutes les couleurs disparaissent, et il ne reste plus que la trace du spectre, ou le dessin de l'image de la chambre obscure, lequel se détache en blanc sur le fond bruni de la plaque d'argent. Ce dessin incolore montre qu'en même temps que la surface sensible s'est colorée, il y a eu réaction chimique, puisque cette trace blanche qui reste dans les endroits frappés par la lumière a tous les caractères de l'argent métallique en poudre très-ténue s'enlevant au moindre frottement. Ce résultat prouve en outre qu'au delà d'une certaine limite on ne peut produire sur la même plaque des images différentes par des alternatives d'exposition à des lumières diverses ; car après un certain temps, quand la surface a été impressionnée suffisamment, elle devient inhabile à donner des couleurs, étant chimiquement décomposée. En la traitant alors par une dissolution ammoniacale, la lame reste couverte d'une poussière d'argent métallique.

Lorsqu'on plonge ainsi dans une dissolution d'ammoniaque une lame recouverte de sous-chlorure d'argent et qui a une image du spectre assez vivement colorée, après la disparition de l'image la place occupée par le spectre apparaît comme une bande grisâtre sur le fond bruni de la plaque. En examinant cette trace avec attention lorsque la lame est encore humide, on voit que l'extrémité qui était rouge avant le lavage a une teinte verdâtre, tandis que l'extrémité auparavant violette tourne au bleuâtre : ces teintes sont complémentaires des premières; une fois la lame sèche, cet effet disparaît. On observe également le même phénomène immédiatement après l'immersion dans l'ammoniaque ou l'hyposulfite de soude des dessins colorés provenant de la reproduction des images de la chambre noire, lorsque la lame est encore humide; ainsi il y a tendance à la production des teintes complémentaires, surtout sur les parties précédemment rouges. Il est impossible, quant à présent, de rendre compte de ces effets.

Comment dans l'état actuel de la science expliquer les effets de coloration des images photographiques avec les couleurs naturelles des rayons actifs? On a vu dans le livre précédent que le sous-chlorure d'argent quand il s'altère donne lieu à un courant électrique que l'on peut facilement apprécier; or ce courant a toujours la même direction quels que soit le rayon lumineux actif et la coloration de la matière; cette circonstance, jointe à la production de la teinte grise uniforme que prend la substance dans tous les rayons quand l'action est suffisamment prolongée, montre que l'on ne saurait admettre autant de réactions dif-

férentes qu'il y a de couleurs dans le spectre. Il y a transformation chimique de la matière impressionnable et en même temps, temporairement, état physique différent de cette matière suivant la réfrangibilité des rayons actifs.

La lumière étant le résultat de vibrations transmises des corps lumineux jusqu'à la rétine, et chaque rayon du spectre correspondant à une vitesse de vibration différente, il peut se faire que la substance sensible qui a été impressionnée par un rayon, c'est-à-dire par des vibrations d'une certaine vitesse, ait acquis la faculté de vibrer plus facilement ensuite sous l'action des vibrations de même vitesse que celle de ce rayon. Ainsi il se produirait dans cette circonstance le même phénomène que celui qui se passe quand une réunion de sons vient frapper une corde tendue; il n'y a que les sons de même hauteur que celui rendu par la corde qui mettent celle-ci en vibration. De même, dans ces phénomènes un faisceau de lumière diffuse qui vient frapper une image colorée produite par la lumière, renfermant une masse de vibrations différentes, chaque partie de l'image vibrerait de préférence sous l'influence des rayons de même longueur d'onde que ceux qui ont agi pour la produire, et alors les rayons réfléchis par les divers points de cette image se trouveraient identiques à ceux qui lui ont donné naissance.

Mais comment se fait-il que d'autres substances chimiquement sensibles ne donnent pas lieu à des effets analogues, et qu'il n'y ait que la substance dont j'ai indiqué la préparation qui jouisse quant à présent de cette faculté de conserver les empreintes des rayons lumineux actifs? C'est ce que des recherches ultérieures pourront peut-être apprendre.

Les reproductions des images du spectre et de celles de la chambre noire avec leurs couleurs naturelles n'ont encore qu'un intérêt purement scientifique, et l'on ne peut songer à leur application actuelle, puisque ces impressions ne subsistent que dans l'obscurité et s'altèrent peu à peu à la lumière. Toutes les tentatives faites jusqu'ici pour empêcher cette altération n'ont pas réussi, et ce n'est que lors d'un état de passage que la matière sensible possède la propriété remarquable de conserver l'empreinte des rayons lumineux actifs; quand cette matière a éprouvé sa transformation complète, toute coloration a disparu. Trouvera-t-on le moyen de conserver ces images quand elles restent exposées aux rayons solaires? les arts pourront-ils s'enrichir d'images peintes par la lumière? C'est ce que l'on ne saurait affirmer actuellement.

Mon but en insistant sur ce sujet a été de faire connaître avec détails la préparation et les effets d'une matière quant à présent unique en son genre, qui a la faculté de reproduire les nuances des rayons lumineux actifs, et qui permet de *peindre avec la lumière*. D'après ce qui a été dit, on voit que l'on peut arriver à des effets déjà très-nets, et je ne doute pas qu'on ne puisse encore obtenir de meilleurs résultats, tant sont profondes les modifications physiques que l'on peut faire subir à cette matière impressionnable si remarquable.

# LIVRE IV.

## EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

## CHAPITRE PREMIER.

### Effets produits sur les végétaux.

§ 1. *Effets généraux. Germination.*

La lumière exerce une action puissante sur les phénomènes de la vie végétale : les fonctions les plus importantes, celles relatives à la nutrition, ne peuvent avoir lieu sans son influence, et c'est par son intervention que le carbone se trouve fixé dans les végétaux; c'est par sa présence également que certains mouvements sont imprimés à leurs organes et que les effets de coloration peuvent avoir lieu; mais il est possible que quelques-uns de ces phénomènes ne soient que des effets secondaires dépendant de l'action chimique qui donne lieu à la fixation du carbone.

On a cherché quelle pouvait être l'influence de la lumière dans la plupart des phénomènes physiologiques de la végétation; dans la germination, il ne semble pas que son action soit bien manifeste, si toutefois elle est appréciable.

La lumière n'est pas utile pour la germination, puisque des graines germent sous le sol; son absence n'est pas non plus indispensable, puisqu'il y en a qui germent sur la terre. Les seules conditions nécessaires sont la présence de l'oxygène, et par conséquent l'accès de l'air et une certaine humidité ainsi qu'un degré convenable de température (1).

(1) Dans beaucoup de graines qui sont privées de la presence de l'air la vie est suspendue et non éteinte. On explique ainsi comment les terrains nouvellement défrichés,

La plupart des observateurs qui ont étudié l'action de la lumière sur la germination ont constaté l'action nuisible qu'elle paraît avoir; on peut citer d'abord Senebier (1) et Lefebure (2); puis MM. Poggioli (3), Ch. Morren (4), Hunt (5) et Zantedeschi (6).

Senebier se servit de grandes bouteilles en verre très-minces dont le fond remontait vers l'orifice et formait une espèce de cloche à double fond, à peu près comme les cloches dont on parlera plus loin; ces bouteilles étaient remplies d'eau colorée de façon à ne laisser pénétrer au-dessous que les rayons tamisés par les matières formant la dissolution. Il employa l'eau rougie par le carmin, l'eau colorée en jaune par le curcuma, et en violet par la teinture de tournesol. La germination de graines de laitue, d'épinards ou de haricots arriva d'abord dans les graines soumises à la lumière jaune, puis dans celles éclairées par la bouteille violette, ensuite dans les graines soumises à la lumière rouge, et enfin dans les graines tenues à l'obscurité.

On ne saurait arriver à une conclusion bien nette au moyen de ces expériences, quant à l'efficacité des divers rayons colorés, car les dissolutions employées ne se laissent pas traverser par des rayons homogènes, principalement la dissolution de tournesol, qui donne les extrémités violettes et rouges du spectre et n'absorbe que la partie moyenne de l'image prismatique. D'un autre côté, les graines ont pu être dans des conditions de température et d'humidité différentes, circonstances qui influent également sur la germination. Les écrans liquides sont très-propres à donner des rayons d'une réfrangibilité déterminée, mais encore faut-il les choisir et analyser avec soin la lumière transmise. Les couleurs bleues et violettes seraient obtenues par des écrans formés avec des sels de cuivre; on peut voir page 226 ce qui a été dit sur ce sujet.

les bords des tranchées profondes sur un sol longtemps intact, se couvrent presque toujours de végétaux nouveaux. Leur apparition indique que des graines enfouies à une époque reculée se sont conservées sans altération; elles germent lorsqu'elles ont le contact de l'air et que les conditions de température et d'humidité sont convenables.

(1) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire*, t. 2, p. 55 (1782).

(2) De Candolle, *Physiologie végétale*, Paris, 1832, t. 2, p. 628.

(3) *Opuscules scientifiques*, Bologne, t. 1, p. 9 (1817). — Ouvrage cité par Dutrochet, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 850.

(4) *Ann. des sciences naturelles*, partie botanique, t. 27, p. 201 (1832).

(5) *Philosoph. Magas.*, avril 1840. — *Bibliothèque univ. de Genève*, 2e série, t. 26, p. 409 (1840). *Id.*, t. 49, p. 383 (1843). *Id.*, t. 53, p. 394.

(6) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 849.

MM. Ch. Morren, Hunt et Zantedeschi ont opéré à peu près par la même méthode, MM. Morren et Zantedeschi en étudiant la germination dans des boîtes fermées par des verres colorés, et M. Hunt en faisant usage d'écrans liquides colorés par du carmin, du chromate de potasse, de l'acétate de cuivre et du sulfate de cuivre ammonical. M. Ch. Morren a reconnu que parmi les différents verres colorés ceux qui se laissent traverser par des rayons d'un pouvoir éclairant assez considérable sont ceux qui favorisent le moins l'acte qui fait développer les organes rudimentaires des plantes. M. Hunt a vu également que les rayons les plus lumineux jaunes et verts nuisent à la germination comme au dévelopement de leur jeune âge, mais que la lumière bleue semble la hâter.

M. Zantedeschi observa que des graines de balsamine germèrent dès le second jour sous le verre vert, le troisième jour sous le verre violet, le quatrième jour sous les verres jaunes et orangés; le cinquième sous le verre bleu, et elles ne germèrent que le neuvième jour à l'air libre. Avec des graines d'*echinocactus Ottonis* la germination eut lieu en vingt-quatre jours dans les cases fermées avec les verres violet et bleu et dans la case à l'air libre; les graines germèrent en vingt-neuf jours sous le verre vert, et en trente sous le verre rouge.

Les conclusions de ces expériences, comme on le voit, sont contradictoires; mais non-seulement, comme on l'a déjà dit, les verres colorés qui n'ont pas été analysés avec soin ne donnent pas des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée, mais encore les conditions d'humidité et de température n'ont peut-être pas été les mêmes dans chaque cas, ce qui ne permet pas de comparer entre eux ces divers résultats.

Les recherches de M. Poggioli ont été faites au contraire avec les rayons du spectre solaire; mais l'auteur s'est borné aux deux parties extrêmes du spectre, c'est-à-dire aux parties rouges et violettes; n'ayant pas d'héliostat, il fut réduit à déplacer à la main les vases où se trouvaient les graines ou les plantes soumises à l'action lumineuse. On indiquera plus loin quels sont les effets qu'il a observés sur les tiges des jeunes plantes; on doit seulement dire ici qu'il a reconnu que les graines de *brassica eruca*, germent plus promptement sous l'action des rayons rouges du spectre que sous l''influence des rayons verts, et plus promptement sous l'influence des rayons verts que sous celle des rayons violets. Les graines étant dans la même chambre et dans les mêmes conditions extérieures, les résultats semblent devoir être plus compa-

rables entre eux que les précédents; cependant, rien ne dit que l'échauffement de la partie rouge du spectre n'ait pas pu joindre son action à l'effet de la lumière?

D'après l'ensemble de ces observations, l'action de la lumière sur la germination paraît plutôt nuisible qu'utile, et les rayons les plus lumineux, qui, d'après ce que l'on verra plus loin, donnent lieu à la plus forte production de la matière verte, sont ceux qui retarderaient le plus l'apparition des tigelles. Il est possible que l'action de ces rayons tendant à favoriser la fixation du carbone soit contraire aux réactions qui s'opèrent dans les graines et qui exigent la présence de l'oxygène pour s'accomplir, la plante à l'état embryonnaire se comportant comme un corps oxydable et pouvant émettre de l'acide carbonique; mais aussitôt que les tigelles sont sorties de terre, la lumière peut agir alors efficacement, et l'on observe les effets qui seront indiqués dans un des paragraphes suivants; toutefois, si son action est trop vive, les jeunes plantes pourraient ne pas tarder à périr.

### § 2. *Inflexion des tiges et des racines sous l'influence de la lumière; nutation des plantes héliotropes.*

On sait que les jeunes branches ou les tiges herbacées des plantes élevées dans une chambre ou dans une serre se dirigent en s'infléchissant vers les croisées; on sait également que les plantes qui croissent à côté des murs tendent à s'en écarter et qu'en général les végétaux ont une tendance à se diriger vers la lumière. Bien plus, dans certaines plantes, le pédoncule qui porte la fleur ou la tête des fleurs se courbe du côté du soleil de façon à se pencher le matin à l'est, au milieu de la journée vers le sud, et le soir vers l'ouest, et à suivre ainsi le mouvement apparent du soleil; c'est là le phénomène que l'on a appelé nutation des plantes. Ce fait est très-facile à vérifier avec l'*helianthus annuus*, qui porte aussi le nom de tournesol.

Ces phénomènes ont dû être remarqués dès la plus haute antiquité, car Pline dans son histoire naturelle revient à plusieurs reprises sur ce sujet.

« Celui-là s'étonnera de ces phénomènes, dit-il (1), qui n'a pas re-
« marqué qu'une plante appelée tournesol regarde toujours le soleil

(1). Pline, *Hist. nat.*, livre 2, chapitre 14. — Traduct. de M. Littré.

« qui s'en va, et tourne continuellement avec lui, même lorsque les « nuages le voilent. »

Et plus loin (1) : « Les feuilles de tous les arbres se retournent chaque « jour sous l'action du soleil, afin que les faces inférieures soient « échauffées. »

En parlant du lupin (2) : « D'abord il suit quotidiennement le soleil « dans sa révolution, et indique les heures aux laboureurs, même dans « un temps couvert. » Il suppose la nature disant à l'agriculteur (3) : « Je t'ai donné des plantes qui indiquent les heures, et afin que tu ne « détournes pas les yeux de la terre, même pour considérer le soleil, « l'héliotrope et le lupin tournent avec lui. »

Il parle encore, en différents passages (4), de l'héliotrope ainsi que de la quatrième tithymale appelée helioscopios (5) (*euphorbia helioscopia*) dont les sommités tournent également avec le soleil, comme son nom l'indique.

A l'occasion des pronostics des tempêtes, il dit (6) « qu'il est certain « que le trèfle se hérisse et dresse ses feuilles à l'approche de la tem- « pête ». Ce qui tendrait à faire supposer qu'on avait peut-être connaissance des mouvements qui constituent ce que l'on nomme aujourd'hui le sommeil des plantes.

Il faut distinguer l'inflexion des tiges des mouvements particuliers des feuilles ou des fleurs, c'est-à-dire des effets de sommeil ; on ne parlera dans ce paragraphe que des premiers effets. Ils n'ont commencé à attirer l'attention des botanistes que vers le milieu du siècle dernier ; Bonnet (7), dans ses recherches sur les fonctions des feuilles et sur le redressement des feuilles et la flexion des tiges, reconnut que cette flexion avait lieu dans les plantes submergées comme dans l'air. Il vit aussi que dans le gui les mouvements de retournement des feuille n'étaient pas appréciables, probablement, suivant lui, d'après une uniformité de composition des tissus formant les feuilles et les tigelles. Bonnet pensait que la flexion des tiges provenait d'une action calo-

(1) Pline, liv. 16, ch. 36.
(2) *Id.*, liv. 18, ch. 36.
(3) *Id.*, liv. 18, ch. 67.
(4) *Id.*, liv. 22, ch. 29.
(5) *Id.*, liv. 26, ch. 42.
(6) *Id.*, liv. 18, ch. 89.
(7) *Recherches sur l'usage des feuilles dans les plantes, etc.*; Gottingue, 1754.

rifique ; mais Tessier (1) prouva par diverses expériences, faites dans des conditions calorifiques semblables, que la flexion des jeunes tiges de blé placées dans une cave et éclairées d'un côté, soit par une fenêtre, soit à l'aide d'un miroir réfléchissant la lumière diffuse extérieure, avait lieu par l'action de la lumière ; ainsi l'agent lumineux seul donne lieu au phénomène dont il est question ici.

Voici du reste les principales conclusions de ses recherches :

1° « De quelque côté qu'on place les plantes qu'on élève, elles se tournent vers la lumière ; si on les dérange de leur penchant naturel en plaçant les vases en sens contraire, d'abord leur extrémité, plus tendre que le reste, se retourne; le surplus de la tige prend, mais lentement et successivement, la même direction. Les feuilles se renversent lorsqu'elles sont à une certaine hauteur, et la plupart du côté de la lumière...»

2° « Que ce soit à la surface de la terre ou dans les souterrains, dans des appartements éclairés ou dans des lieux qui reçoivent peu de jour, qu'on sème des graines pour les élever, les jeunes tiges se pencheront toujours vers la lumière.... »

3° « La flamme d'une chandelle ne me paraît être autre chose que la lumière du jour dans un état différent. Il n'est donc pas étonnant que j'aie vu des plantes s'incliner vers cette espèce de lumière, moins fortement sans doute que vers la lumière du jour réfléchie..... »

Avant d'indiquer quels sont les effets divers qui peuvent se présenter avec différentes plantes ainsi que les explications que l'on a tenté de donner, il faut examiner quelles sont les parties du rayonnement lumineux qui interviennent dans la production de ces effets. On a déjà dit plus haut que M. Poggioli avait cherché quelle pouvait être l'action du spectre lumineux dans la flexion des tiges; mais il s'est borné à comparer les deux extrémités du spectre, et on ne peut conclure rien de positif de ses observations ; les travaux de Payer (2) et de M. Gardner (3) ont éclairci ce point scientifique.

Payer a opéré sur de jeunes tiges de cresson alénois venues dans l'obscurité sur du coton humide, tiges qui se courbent et s'inclinent rapidement quand elles sont placées dans une pièce d'un apparte-

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 102, p. 133 (1783).

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 15, p. 1195 (1842), t. 18, p. 32 (1844).— *Id*, *Rapport sur ces mémoires*, t. 16, p. 986.

(3) *Philosoph. Mag.*, janv. 1844.— *Biblioth. univ. de Genève*, 2e série, t. 49, p. 376 (1844). — *Id.*, t. 52, p. 381.

ment éclairée d'un côté par une ouverture, ou bien lorsqu'elles sont mises dans une boîte dont une des parois reçoit seule la lumière. Il a observé d'abord que lorsqu'on place dans cet appartement, ou dans cette boîte, une plante qui a poussé à l'obscurité et qui est verticale, la jeune tige se courbe d'abord, puis s'incline vers la lumière, c'est-à-dire qu'il y a deux effets successifs ; dans le premier, la partie inférieure de la tige est encore verticale et la partie supérieure plus au moins horizontale ; dans le second, la partie supérieure s'est un peu redressée et la partie inférieure légèrement inclinée, de sorte que la tige est redevenue droite et se trouve dirigée vers la lumière. Il a montré que pour qu'une plante se courbe ainsi du côté d'où vient la lumière, il n'est point nécessaire que le point de courbure soit directement éclairé; il a également observé que le milieu dans lequel se trouve la plante n'a d'influence que sur la vitesse avec laquelle la courbure s'opère, car au sein de l'eau (ainsi que Tessier l'avait déjà remarqué), comme dans une atmosphère d'azote ou d'hydrogène, la courbure finit toujours, avec des temps différents, par avoir le même degré, lorsque les autres circonstances sont égales d'ailleurs.

Examinant ensuite quels sont les effets produits lorsque les petites plantes au lieu d'être placées dans une boîte à une seule ouverture sont mises dans une boîte à deux ouvertures, et par conséquent reçoivent l'action de la lumière dans deux directions différentes, il a observé que si ces deux ouvertures se trouvent du même côté de la boîte, et que l'intensité des lumières soit égale, la tige se courbe dans la direction de la résultante, c'est-à-dire de la bissectrice de l'angle formé par les deux faisceaux de rayons ; mais lorsque cette intensité est inégale, soit au moyen d'ouvertures d'étendue différente, soit au moyen d'écrans à l'une des ouvertures, la tige se courbe toujours dans la direction de la lumière la plus forte. Quand les ouvertures sont placées en face l'une de l'autre sur deux faces opposées de la boîte, les lumières d'intensité égale laissent la tige droite, et dans le cas d'inégalité la plante se courbe du côté de la plus intense. Il résulte de là que l'inflexion est la plus grande quand les rayons diffusés tout autour de la plante sont éliminés autant que possible, et que la lumière ne pénètre que par une ouverture dans l'enceinte où se fait l'expérience.

Pour étudier l'influence des rayons de différente réfrangibilité sur la production de ce phénomène, Payer a répété d'abord les mêmes expériences avec des boîtes fermées d'un côté par des verres colorés

bien analysés, puis en éclairant les plantes avec les différents rayons du spectre solaire rendu fixe au moyen d'un héliostat. Dans ce dernier cas, les tigelles de cresson étaient placées dans une boîte partagée en divers compartiments, et chaque compartiment était tapissé à l'intérieur de noir de fumée et n'offrait qu'une petite ouverture par laquelle était introduite le rayon coloré. Il a trouvé ainsi que sous l'action des rayons les moins réfrangibles, c'est-à-dire des rayons rouges, orangés, jaunes, verts, la plante se conduit comme à l'obscurité, et ne se courbe pas, tandis que sous l'action des rayons bleus et violets elle s'infléchit toujours.

Ainsi la partie active de la lumière pour opérer la flexion des tiges est surtout la partie la plus réfrangible du rayonnement lumineux, c'est-à-dire l'espace compris entre les raies F et H du spectre solaire, et le maximum d'effet a paru être placé dans le bleu, ou près de la raie G. Cette action, qui est la plus énergique dans la partie F H du spectre, doit s'étendre au delà de H dans l'ultra-violet et probablement du côté du vert, comme on le verra plus loin; mais Payer ne s'est pas occupé de vérifier ce fait.

M. Gardner a fait des expériences analogues quant à la flexion, mais en même temps il a cherché à démontrer que la partie du rayonnement lumineux qui donne lieu à ce phénomène n'était pas celle où les tiges des plantes se coloraient le plus vivement; en effet, l'inflexion est produite surtout par le bleu et le violet et est à son maximum dans la partie que l'on avait nommée l'indigo du spectre (c'est-à-dire vers la raie G), tandis que la couleur verte est développée de préférence par les parties orangées et jaunes et est à son maximum dans le jaune.

Il a employé des semis de navets, de raves, de moutarde, de pois, de fèves, des plants de *solanum nigrum* et *virginiacum*, de *plantago major* et *minor*, etc.; mais il a principalement fait usage des navets, ces plantes fournissant les meilleurs résultats. Il les semait et les laissait se développer dans l'obscurité jusqu'à ce qu'ils eussent atteint de 5 à 7 centimètres de longueur. En plaçant ces semis dans différentes boîtes exposées aux rayons d'un spectre, il pouvait juger des différents résultats obtenus. Si l'on se reporte à la description qu'il en donne, le spectre avec lequel il a opéré ne se présentait pas avec toutes ses raies; mais cette image ayant de 70 à 80 cent. de longueur était suffisamment étalée pour que les effets des divers rayons pussent être appréciables.

Il a reconnu d'abord, comme on le verra dans un des paragraphes

suivants, que la partie la plus lumineuse de l'image prismatique produit la coloration verte des plantes avec le plus d'intensité; c'est également sous l'influence de ces rayons que se manifeste le plus grand dégagement du gaz oxygène. En exposant au spectre un semis de navets placés dans une boîte sans compartiment, il a vu les plantes se pencher vers un axe commun; celles qui étaient exposées aux rayons rouges, orangés, jaunes et verts se sont inclinées vers le bleu foncé (indigo), tandis que les plantes éclairées par le violet se sont penchées à leur rencontre. L'expérience ayant été prolongée, le semis a pris l'apparence d'un champ de blé courbé par deux vents opposés; l'axe commun vers lequel se sont dirigées toutes les plantes est la ligne que suit le rayon indigo en allant du prisme au semis. Quant aux plantes qui étaient placées dans ces rayons bleus violets, elles se sont penchées vers le prisme; les autres se sont inclinées diagonalement de telle sorte que les plantes éclairées par le bleu et le violet ont été peu déviées de la ligne que suivaient les rayons qui les éclairaient. Dans cette expérience, la lumière diffusée sur les tigelles a peut-être agi comme éclairant les plantes voisines, et il reste à examiner, comme on le verra plus loin, quel peut être l'effet de compartiments placés entre les plantes.

M. Gardner a conclu de ses recherches, comme Payer, que les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui opèrent principalement la flexion des jeunes tiges, le maximum d'action ayant lieu vers la raie G, les rayons rouges, orangés, jaunes et verts n'ayant aucune action appréciable; en outre de cela, ces rayons ne donnent pas lieu à la plus forte coloration verte des plantes, qui est à son maximum dans le jaune prismatique.

Il faut ajouter encore que M. Gardner a reconnu que l'effet était bien dû à une action de la lumière sur la tige, car il a lieu après l'enlèvement des feuilles; quant aux plantes penchées, elles se redressent dans l'obscurité, ce qui montre que le mouvement n'est que transitoire et n'est pas accompagné d'un changement permanent dans la structure de la plante. Les rayons de la lune peuvent également produire un mouvement sur des tiges en deux heures; les lumières artificielles peuvent agir de même, et une lampe d'Argant produit le même effet à peu près dans le même temps; du reste, on a vu que Tessier avait déjà observé ce fait.

Dutrochet (1), en repétant les expériences de Payer, a vérifié les

(1) *Mémoires pour servir à l'histoire physiologique des végétaux et des animaux*, t. 2, p. 61-1837.— *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1085; t. 18, p. 1169.

résultats indiqués plus haut relativement aux plantules de cresson alénois, mais il a annoncé que sous l'influence d'un verre rouge, si celles-ci ne présentent aucune inflexion, des tigelles d'un moindre diamètre peuvent être influencées; il a observé que dans ces conditions les *lepidium sativum*, *medicago sativa*, *medicago lupulina*, *trifolium pratense*, ayant des diamètres de tigelle compris entre 65 et 80 centièmes de millimètre, n'ont présenté aucun effet, tandis que le *senecio vulgaris*, l'*alsine media*, le *papaver somniferum*, etc., avec des diamètres compris entre 45 et 20 centièmes de millimètre, ont offert une inflexion. Il peut se faire que ces différences tiennent à ce que le verre rouge dont Dutrochet s'est servi ne laissait pas traverser des rayons homogènes; cependant, il est possible également que l'effet de flexion, bien que beaucoup plus faible en s'éloignant du maximum d'action, c'est-à-dire du violet, soit appréciable dans le rouge prismatique si l'intensité des rayons est suffisante et si la sensibilité des plantes est très-grande; nous verrons plus loin que d'autres expériences conduisent à cette dernière conclusion.

Dutrochet s'est occupé aussi de répéter les expériences de Payer et de M. Gardner sur le spectre solaire, et il a formé un spectre d'une intensité suffisante et dont les couleurs étaient bien étalées. Il a opéré avec les jeunes tiges de moutarde blanche; il a vu que la courbure se produit d'abord dans le violet, là où se trouve l'action maximum, puis que le mouvement de flexion vers le prisme se montre dans les tiges soumises aux rayons bleus et dans l'ultra-violet, c'est-à-dire à droite et à gauche de la position du maximum. Ce n'est que plus tard que les tiges situées dans les rayons jaunes et verts se fléchissent, et enfin celles qui se trouvent exposées aux rayons rouges; pendant ce temps la flexion s'étend au delà du violet, à une distance qui est presque égale à celle du spectre visible. Lorsque l'intensité des rayons solaires est moindre ou que le spectre est formé par un faisceau moins large, alors la flexion des tiges vers le prisme ne se produit que dans la partie la plus réfrangible de l'image spectrale, et elle n'atteint pas les tiges éclairées par les rayons orangés et rouges ainsi que par la partie ultra-violette. Il pense donc que Payer n'avait pas opéré avec des spectres très-intenses, car ce physiologiste n'avait indiqué que les effets produits dans les parties où ils sont les plus énergiques, c'est-à-dire dans le bleu et le violet.

En même temps, Dutrochet a observé le phénomene de flexion latérale remarqué par M. Gardner et dont il a été question plus haut, phénomène qui ne commence à être appréciable qu'une demi-heure ou

même une heure après la manifestation de la flexion des tiges vers le prisme dans les rayons violets. Cette flexion latérale ou parallèle à la direction du spectre commence dans la partie jaune, et précède souvent dans ces rayons la flexion vers le prisme ; elle a lieu aussi dans les rayons violets, où les tiges s'inclinent du côté des rayons bleus violets correspondant à peu près à la raie G; ces derniers sont les seuls sous l'influence desquels les plantes se dirigent uniquement vers le prisme. Comme le spectre est toujours accompagné de lumière diffuse, on peut se demander si les rayons actifs qui illuminent le prime ainsi que les tigelles qu'ils frappent, étant diffusés en tous sens n'agiraient pas alors sur les plantes.

Dutrochet a observé le fait suivant dans des circonstances qui sont à signaler, et qui excluraient l'hypothèse précédente : Il a pris un verre rouge qui, recevant un rayon solaire, ne transmettait que les rayons rouges; afin d'avoir la certitude de n'opérer qu'avec des rayons de cette réfrangibilité, ce verre étant placé devant l'ouverture de la chambre noire, le faisceau de rayons solaires transmis fut réfracté au travers du prisme, et on ne reçut sur un écran qu'une aire circulaire rouge; les autres parties du spectre n'étaient pas visibles, et étaient absorbées. De jeunes tiges de moutarde blanche placées dans cette aire de lumière rouge pure se courbèrent vers le prisme ou vers la lumière rouge, les premières au bout d'une heure, les dernières après deux heures et demie. Mais ce qu'il y eut de remarquable, c'est qu'il y eut une flexion latérale vers l'espace qui dans l'état ordinaire aurait dû être occupé par les divers rayons colorés du spectre, lesquels ici n'existaient pas. Ainsi, en outre de la flexion vers la lumière, il y avait une flexion latérale donnant à la plante la direction de la résultante des deux effets. Il faut ajouter que près de l'aire circulaire rouge, et dans les parties où se serait trouvé le spectre absorbé, il y avait d'autres tiges qui n'éprouvèrent aucune inflexion ni dans un sens ni dans l'autre.

M. Guillemin (1) a étudié le phénomène de flexion des tiges de cresson alénois et de moutarde blanche en se servant d'un spectre assez épuré pour séparer les différents rayons réfrangibles et en opérant avec différents prismes; mais il n'est pas nécessaire d'insister sur l'effet que peut avoir la nature des prismes, car on a vu, page 102 et suivantes, que les différentes substances incolores n'exercent d'action

(1) *Annales des sciences naturelles*, partie botanique, 4e série, t. 7.

absorbante que sur les rayons qui sont situés dans l'ultra-violet ou l'infra-rouge, c'est-à-dire en dehors du spectre visible.

Il a trouvé, comme Dutrochet, que si la flexion a lieu avec la plus grande force dans les rayons les plus réfrangibles, elle s'étend d'une part au delà du violet, et de l'autre dans le rouge et en deçà, de sorte qu'elle a lieu dans une étendue beaucoup plus grande que celle du spectre lumineux. Mais au lieu d'un maximum de flexion il en a trouvé deux : le premier, le plus énergique, a lieu dans la partie ultra-violette, entre H et I ; le second est dans le rouge, mais sa position est plus variable que le précédent, car il peut, suivant des conditions atmosphériques, se rapprocher du vert; entre ces deux maxima il y a un minimum d'action près de F dans le bleu.

D'après ces résultats, la flexion des plantes, comme la coloration de l'iodure d'argent (voir page 88) et des sels de cuivre (voir page 96) serait fort inégale dans le spectre, car les précautions que M. Guillemin a prises lui ont permis d'éliminer toute lumière diffuse et de séparer les différents rayons actifs, ainsi que de mieux préciser la position des maxima et minima d'action. Si MM. Payer et Gardner n'ont pas obtenu d'effet sensible en dehors des parties voisines du premier maximum, cela peut résulter de la dilatation de leur spectre, qui avait diminué l'intensité des régions de l'image prismatique, où les effets étaient moindres. D'un autre côté, l'empiétement des images formées par les rayons voisins peut expliquer aussi pourquoi la position du maximum dans leurs expériences a paru être dans le violet, tandis que M. Guillemin l'a trouvé à la limite de l'extrême violet, entre H et I. Les expériences de ce dernier opérateur ont donc permis de mieux analyser la position des parties actives du spectre qu'on ne l'avait fait avant lui.

M. Guillemin, comme M. Gardner et Dutrochet, a constaté la flexion latérale qui s'est étendue habituellement au delà des rayons rouges et violets ; elle a eu pour centre, dans tous les cas, les rayons bleus foncés, c'est-à-dire la raie G. Souvent elle s'est produite malgré la présence des écrans, et pour l'empêcher il fallait en augmenter le nombre ou diminuer l'intensité du spectre.

Ce phénomène de flexion latérale s'exerçant malgré la présence d'écrans qui isolent les plantes est assez difficile à comprendre, et il faudrait s'assurer si dans les expériences il n'y a pas eu diffusion de la lumière dans quelques points, et si cette diffusion ne serait pas la

cause de la direction suivie par la plante; car il ne me paraît pas probable de supposer que la partie éclairée de la surface du cylindre qui forme la tigelle, ayant ses différents points soumis à des actions inégales, puisqu'à partir de chaque maximum les effets décroissent des deux côtés, la plante tout en s'infléchissant vers la lumière s'incline du côté de la partie du cylindre qui est la plus excitée ; c'est un point qui mérite d'être éclairci.

On voit, d'après ces recherches, que si le phénomène de flexion des plantes vers la lumière a lieu sous l'influence de rayons de longueur d'onde diverse, cependant il est à son maximum près du violet, c'est-à-dire dans la partie la plus réfrangible de l'image prismatique; en outre cette partie n'est pas celle dans laquelle se produit avec le plus d'énergie la coloration verte des plantes étiolées.

Cette action des rayons lumineux pour fléchir les jeunes tiges paraît à peu près générale; cependant on a indiqué quelques exceptions, et Knight (1) en observant les effets de la lumière sur les vrilles de la vigne vierge (*ampelopsis quinquefolia*), et du pois cultivé (*pisum sativum*), a expliqué leur enroulement en disant que frappées par la lumière elles se dirigent du côté opposé, et par conséquent vers les obstacles, autour desquels elles s'attachent. Ces organes fuiraient donc la lumière au lieu d'être fléchis vers les parties éclairées. Dutrochet (2), tout en admettant le fait, a cité une expérience d'après laquelle des tigelles de gui se sont dirigées du côté opposé à la lumière au lieu de se fléchir du côté éclairé. Il a montré également que plusieurs plantes grimpantes, telles que le houblon (*humulus lupulus*) et une tige de grand liseron (*convolvulus sepium*), placées dans des vases pleins d'eau dans une chambre éclairée par une fenêtre, se sont éloignées de la fenêtre en se courbant vers le fond de l'appartement. Ainsi, suivant les cas, les tiges des plantes pourraient se fléchir vers la lumière ou se diriger en sens contraire; mais on reviendra plus loin sur ce sujet.

Payer (3) a découvert que si les tiges des plantes s'infléchissent vers les sources lumineuses, les racines peuvent éprouver une action inverse et sembler fuir la lumière. Cette action n'est pas aussi générale

(1) *On the motions of the tendriels of plants; Philosoph. transact.*, 1812, t. 102.
(2) Ouvrage déjà cité, t. 2, p. 61.
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1043. — *Rapport sur ce mémoire, id.*, t. 18, p. 1169.

que l'action contraire qui est exercée sur les tiges, car si toutes celles-ci s'infléchissent plus ou moins, toutes les racines ne fuient pas la lumière, et un certain nombre n'éprouvent aucune action de la part de cet agent.

Pour observer cet effet, d'après Payer, il suffit, dans une chambre éclairée par une fenêtre, de faire germer des graines de chou ou de moutarde blanche sur du coton flottant dans un vase rempli d'eau : en même temps que les tiges s'inclinent vers la lumière, les racines plongent dans l'eau, et se courbent en sens inverse, de façon que chacune des jeunes plantes représente assez bien la figure d'une *S*. Pour ces deux plantes ainsi que pour d'autres, ce phénomène se manifeste toujours, que ce soit la lumière diffuse ou la lumière solaire directe qui pénètre dans l'appartement. Mais il en est d'autres, telles que le *sedum telephium*, chez lesquelles une lumière diffuse ordinaire, bien qu'agissant fortement sur les tiges pour les incliner, n'a cependant aucune influence sur les racines, qui restent droites et qui ne fuient que les rayons directs du soleil. Pour d'autres enfin, comme le cresson alénois, les rayons directs du soleil, aussi bien que la lumière diffuse, sont sans action sur les racines. Il y a donc des différences très-grandes quant aux effets produits sur les racines.

Les expériences faites avec un spectre fixe ont montré à Payer que la partie la plus active était la même que celle qui agissait pour opérer le plus vivement la flexion des tiges, et il a énoncé ce fait que la région de l'image prismatique où les racines se courbent le plus est aussi celui où les tiges s'inclinent le plus, c'est-à-dire que pour une même plante le maximum d'action est le même pour les racines et les tiges. Il pense que cette action sur les tiges et les racines a une grande influence sur la tendance des tiges vers le ciel et des racines vers la terre.

Payer, dans ses recherches, a énoncé ce fait que la position du maximum d'action est variable pour les différentes plantes, mais que le phénomène de flexion a toujours lieu principalement dans la partie la plus réfrangible du spectre.

Dutrochet (1) a répété les expériences de Payer, les a vérifiées et y a ajouté quelques observations nouvelles : en opérant avec la moutarde blanche, comme ce physiologiste, la flexion des racines pour fuir la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 1169.

lumière lui a paru s'opérer exclusivement dans leur pointe ou dans leur spongiole, qui est la seule partie qui chez elles s'accroissent en longueur, en sorte qu'il pense que c'est en s'accroissant que ces racines se courbent. Si l'on retourne vers la lumière la pointe des racines qui se sont fléchies pour la fuir, la flexion acquise persiste, ce qui n'a point lieu pour les tiges, chez lesquelles la flexion précédemment acquise se renverse ; c'est par la partie de leur pointe que l'accroissement a allongé que s'opère dans ce cas la nouvelle inflexion des racines pour fuir la lumière. Il a pu faire ainsi retourner jusqu'à quatre fois des racines de moutarde blanche, lesquelles demeurèrent disposées en zigzag, tandis que les tiges qui avaient subi également les renversements alternatifs de direction n'offraient qu'une seule courbure, celle qui était la dernière acquise, laquelle avait détruit la précédente.

Dutrochet vérifia aussi le fait découvert par Payer que les racines de certaines plantes, et entre autres de la moutarde blanche, éprouvent l'effet de fuite de la lumière principalement dans les rayons les plus réfrangibles, c'est-à-dire dans les rayons violets et bleus. Plusieurs expériences faites avec un spectre fixe et bien étalé lui ont donné le même résultat. Pour opérer facilement, les jeunes plantes de moutarde blanche étaient placées dans de petites ouvertures faites à des lames minces de liége qui flottaient sur l'eau contenue dans des vases en verres à faces parallèles. La longueur des racines soumises à l'influence lumineuse était de 20 à 24 mill. Trois heures après le commencement de l'expérience, la flexion en arrière et en crochet de la pointe des racines a commencé dans les rayons violets, lieu du maximum d'action; quelque temps après, cette même flexion s'observait dans le bleu et dans l'ultra-violet. La fuite de la lumière, toujours par la pointe des racines, se manifesta pendant les heures suivantes dans les autres rayons du spectre.

Six heures après le commencement de l'expérience, Dutrochet observa d'abord dans les rayons jaunes et ensuite dans l'orangé une flexion latérale de la pointe des racines, flexion dirigée vers l'espace éclairé par les rayons rouges. Cette flexion, se combinant avec celle de la fuite de la lumière qui la croisait à angle droit, il en résultait que les pointes des racines étaient courbées en crochet suivant la résultante de ces deux tendances. Ainsi voilà une flexion latérale analogue à celle que Gardner avait observée avec les tiges, et dont on a parlé plus haut.

Les corps des racines ne changèrent nulle part de position ; leurs

pointes seulement, dans l'étendue de 3 à 4 millim., se courbèrent en crochet. Or, d'après Dutrochet, cette étendue était la longueur dont elles s'étaient accrues pendant les plusieurs heures d'expériences, de sorte qu'il a admis que la double flexion s'était opérée dans la partie récemment produite par l'allongement des racines.

Il faut examiner actuellement comment les botanistes ont cherché à expliquer ces effets si curieux : d'après Senebier (1) la tendance des tiges vers la lumière pourrait provenir du dégagement de gaz produit par l'action solaire ; mais on verra que ce ne sont pas les rayons de même réfrangibilité qui donnent lieu avec la même intensité à ces deux ordres d'effets. De Candolle (2) a pensé que le phénomène de courbure ou de tendance des tiges rentrait dans les lois connues de l'étiolement ; car, disait-il, la moitié non éclairée de la tige, étant étiolée, s'allonge plus que les autres parties, tandis que la portion éclairée prend un moindre développement ; de là la courbure du côté de la lumière. Mais les expériences faites avec les différents rayons réfrangibles, et dont il vient d'être question, sont complétement contraires à cette hypothèse, car la coloration verte et par conséquent les phénomènes de respiration sont dus aux rayons les moins réfrangibles, c'est-à-dire aux rayons jaunes et verts, tandis que l'inflexion est produite principalement par la partie violette de l'image prismatique. D'un autre côté, comme les plantes étiolées s'allongent plus que les autres, la moitié non éclairée d'une tige deviendrait active pour la courber vers la lumière, ce qui est contraire aux expériences, comme on va le voir.

Dutrochet (3) a montré en effet que c'était le côté éclairé qui était actif pour opérer la courbure : ayant pris des tiges herbacées qui, placées dans une pièce éclairée, s'étaient courbées vers la lumière, il les a fendues en deux moitiés longitudinalement dans le sens de la courbure, et de façon à séparer dans chacune la partie qui avait été éclairée de la partie opposée. A l'instant de la séparation, pour chaque tige, la moitié située du côté concave a pris une courbure plus grande, tandis que l'autre partie s'est redressée et ensuite n'a pas tardé à se courber en sens inverse. Ainsi, la flexion est due à la partie éclairée. Mais comment peut-elle s'opérer? Suivant ce physiologiste cette incur-

(1) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire, etc.*, t. 2, p. 285 (1782).

(2) *Mém. de la Société d'Arcueil*, t. 2, p. 109 (1809).

(3) *Mémoires pour servir à l'hist. anat. et phys. des végétaux*, t. 2, p. 60 (1837).

vation s'effectue par l'action de deux tissus différents : le tissu cellulaire ou parenchimeux, et le tissu fibreux. Le tissu cellulaire se courbe par turgescence ou par implétion de liquide ; le tissu fibreux par oxygénation. D'après cela, l'action de la lumière augmentant la transpiration, diminue la turgescence de la partie du tissu cellulaire éclairée, de sorte que sa force d'incurvation est diminuée ; la force d'incurvation du tissu fibreux par oxygénation est au contraire augmentée par l'action lumineuse, de façon que la tige doit s'infléchir. Cette explication ne saurait être satisfaisante, car elle s'appuie sur une hypothèse non encore démontrée, l'action de l'oxygène sur le tissu fibreux ; d'un autre côté, si la transpiration ainsi que la respiration sont influencées par la lumière lors des réactions dues à la nutrition, ces réactions ont lieu principalement dans la partie la moins réfrangible de la lumière, laquelle ne donne pas lieu aux effets d'inflexion qui sont à leur maximum sous l'influence des rayons violets.

Depuis Dutrochet, M. Ratchinski (1) a essayé d'expliquer la tendance des tiges vers la lumière ; il a cru d'abord devoir conclure, contrairement aux idées de Dutrochet, que le système médullaire n'a aucune action et que la tendance à l'incurvation en dehors qu'offrent les tiges herbacées est déterminée par le système cortical. Suivant lui, le liber ne joue aucun rôle ; mais le parenchyme de l'écorce, qui est la partie active, est composé de deux couches : la couche extérieure située immédiatement au-dessous de l'épiderme qui renferme peu de chlorophylle, et qui se confond quelquefois avec la couche intérieure de l'écorce, et la couche intérieure du parenchyme, qui est un tissu dans lequel a lieu un travail chimique très-actif d'assimilation. Ce serait donc alors par la turgescence de ce parenchyme interne de l'écorce, qui augmenterait sous l'influence de la lumière, que le phénomène d'incurvation aurait lieu, malgré la tendance en sens contraire, mais plus faible, qui existerait de l'autre côté de la tige.

Il a fait remarquer à cette occasion que les familles des chénopodées, des amarantacées, des malvacées, qui se distinguent par le développement du stratum interne de leur écorce, offrent beaucoup de plantes héliotropes ; les composées, dont le tournesol fait partie, sont aussi dans ce cas. D'un autre côté, les plantes monocotylédones, qui ont

(1) Notice sur quelques mouvements opérés par les plantes sous l'influence de la lumière. *Bulletin de la Société impériale de Moscou*, t. 30, 2me partie, p. 221, 1857.

ce tissu peu développé, ont une tendance moins prononcée à se fléchir vers la lumière.

Ces hypothèses sont basées sur la turgescence des tissus produite directement ou secondairement par des réactions chimiques dues à la lumière. Mais quelles seraient ces réactions? Sont-ce les effets qui conduisent à la formation de la matière verte et à l'émission de gaz oxygène? Or, comme on l'a déjà dit, les rayons sous l'influence desquels ils ont lieu sont surtout compris dans la partie la moins réfrangible du spectre, tandis que ceux qui donnent lieu à la flexion sont principalement les rayons bleus et violets. Ce ne serait donc que des réactions qui se manifesteraient dans cette dernière partie de l'image prismatique, et qui n'auraient pas encore été définies jusqu'ici, qui donneraient lieu à ces divers effets.

Il résulte de tout ce qui précède que, les phénomènes de la vie végétale étant extrêmement complexes, si la lumière exerce une action manifeste sur l'excitabilité des plantes, il faut attendre pour chercher à donner une explication satisfaisante des effets observés que l'on soit plus avancé dans l'étude de toutes les circonstances de ces curieux phénomènes.

### § 3. *Mouvements divers. — Sommeil des fleurs et des feuilles. — Enroulements.*

La lumière exerce une influence sur divers mouvements exécutés par les organes des plantes, et dont il est nécessaire de parler ici; si l'on n'a pas étudié l'action des différentes parties du rayonnement comme dans les effets d'inflexion, cependant plusieurs physiologistes sont arrivés à des résultats intéressants relativement à l'intervention lumineuse. Les mouvements dont il va être question sont ceux qui constituent ce que l'on nomme le sommeil de plantes et les enroulements des tiges flexibles.

*Fleurs.* — On désigne sous le nom de sommeil la position particulière que les fleurs et les feuilles de certaines plantes prennent pendant la nuit, comparativement à la position qu'elles occupent pendant le jour. Les fleurs d'un grand nombre de plantes ne présentent pas cet effet; elles s'épanouissent et se conservent en cet état jusqu'à la mort de la corolle, qui se flétrit et tombe sans s'être fermée. D'autres s'ouvrent une seule fois, n'ont qu'une seule occlusion ou qu'un seul sommeil, qui précède

immédiatement la mort de la corolle; telles sont les fleurs des cistes, des *mirabilis*, des *convolvulus*, etc.; on les appelle éphémères, et on peut distinguer les éphémères diurnes et les éphémères nocturnes. D'autres fleurs, enfin, s'ouvrent et se ferment plusieurs fois en présentant pendant plusieurs jours les alternatives des deux positions de réveil et de sommeil; telles sont les fleurs des ficoïdes, des chicoracées et de beaucoup de synanthérées.

Linné a le premier étudié ces phénomènes (1), en se bornant à noter les heures diverses auxquelles les fleurs s'épanouissent et se ferment, et a composé ce qu'il a appelé l'horloge de Flore; mais il n'a pas cherché quelle pouvait en être la cause. De Candolle (2) a soumis un certain nombre de fleurs à l'influence d'une lumière artificielle, et sur plusieurs d'entre elles a observé des résultats curieux; pour suivre ces expériences au Muséum d'histoire naturelle, il a placé les plantes dans deux caveaux à l'abri de la lumière du jour dont la température était maintenue en moyenne à 20°; l'un est resté obscur, l'autre était éclairé par la lumière de six lampes qui, éclairant chacune comme neuf bougies, donnaient une lumière équivalente à celle de cinquante-quatre bougies.

Les fleurs éphémères n'ont pas été influencées de la même manière; on sait que les cistes fleurissent le matin, et que leurs fleurs tombent au plus tard dans l'après-midi. Les cistes placés dans l'obscurité ont fleuri plusieurs fois de suite à la même heure qu'en plein air; mais dans quelques espèces la floraison a duré davantage, et quelques-unes se sont fermées avant de tomber, ce qui n'arrive jamais à ces fleurs. L'effet de la privation de lumière a donc été de prolonger leur épanouissement.

Les œnothères fleurissent le soir, et commencent à passer le lendemain matin. Plusieurs de ces plantes ont été placées dans le caveau éclairé au moment où des fleurs de chacune d'elles venaient de s'épanouir. L'*œnothera tetraptera* a commencé à se flétrir une heure après; mais malgré la continuité de la lumière, le lendemain, à son heure ordinaire, elle a épanoui deux fleurs qui ont duré pendant le même temps que celles des individus restés à l'air libre. L'*œnothera suaveolens* (onagre odorante), loin de conserver sa fleur douze à quatorze heures comme à l'air libre, ne l'a perdue qu'au bout de quarante-huit heures; le lendemain, à son

(1) Voir *Somnus plantarum, etc.*, et ouvrages cités plus loin.

(2) Expériences relatives à l'influence de la lumière sur quelques végétaux, *Mémoire des savants étrangers de l'Institut de France*, t. Ier, p. 329, 1805.

heure ordinaire, elle a épanoui deux nouvelles fleurs, qui n'ont duré que vingt-quatre heures ; l'*œnothera anomala* s'est fermée à son heure ordinaire, et ne s'est pas rouverte.

Les belles de nuit (*mirabilis jalappa*) ont subi une action plus régulière : à la lumière continue des lampes elles ont développé leurs fleurs le soir à l'heure accoutumée, ou un peu plus tôt, et les ont fermées le matin un peu plus tard qu'à l'ordinaire ; il en a été de même à l'obscurité continue. Mais on a, pendant trois jours de suite, allumé les lampes à huit heures du soir et on a les éteintes à six heures du matin, de façon à intervertir pour ces plantes les heures de jour et de nuit. Pendant vingt-quatre heures la floraison des belles de nuit n'a offert aucune variation régulière, mais ensuite ces plantes se sont mises à fleurir le matin et à se fermer le soir contrairement à ce qu'elles sont à l'air libre. Ainsi, dans ces trois genres de plantes à fleurs éphémères, les *mirabilis jalappa* seules ont manifesté des changements dans les heures d'éveil et de sommeil, par suite de l'action de la lumière ; on ne peut dire qu'il n'y ait pas d'influence dans les autres cas, mais il serait possible que l'intensité de la lumière dont on a fait usage n'eût pas été suffisante, et que chacune de ces plantes exigeât des intensités différentes pour manifester l'influence lumineuse.

La même réflexion peut s'appliquer aux expériences faites par de Candolle avec les fleurs qui s'ouvrent et se ferment plusieurs fois, car plusieurs d'entre elles ont indiqué une action de la lumière, tandis que d'autres n'ont présenté que des effets irréguliers : L'*ornithogallum umbellatum* s'ouvre à onze heures le matin et se ferme à trois heures après midi; pendant quatre jours un rameau de cette plante mis dans l'eau et transporté fréquemment d'un lieu éclairé à un lieu obscur s'est toujours ouvert au jour et fermé à l'obscurité.

Des rameaux de *convolvulus purpureus* en boutons, ayant été exposés à la lumière continue des lampes à huit heures du soir, à dix heures les fleurs se sont ouvertes comme celles qui étaient restées à l'air libre; mais tandis que cette fleur se ferme habituellement à midi, celles du caveau éclairé se sont fermées à sept heures du matin; elles ont refleuri à six heures du soir, et se sont fermées à minuit. Ainsi la continuité de la lumière a hâté les périodes pendant lesquelles s'exécutent les mouvements de ces fleurs. Au contraire, les *convolvulus arvensis* et *cneorum*, ayant été exposés fermés à la lumière se sont ouverts à leur heure ordinaire, et ne se sont point refermés. Le *convolvulus cneorum*

mis ouvert à l'obscurité s'y est fermé à son heure accoutumée, et ne s'est point rouvert.

Parmi les ficoïdes, les *mesembryanthemum cordifolium*, *echinatum* et *hispidum* se sont fermés, et ne se sont jamais ouverts soit à l'obscurité, soit à la lumière continue des lampes, soit à la lumière intermittente, soit à une température de 25° à 35°. Mais il faut remarquer qu'à l'air libre ces espèces ne fleurissent qu'en plein soleil et ne s'ouvrent pas si le temps est couvert. Plusieurs autres espèces de *mesembryanthemum* ont manifesté recevoir une impression irrégulière de la part de la lumière, mais le *mesembryanthemum noctiflorum*, exposé à la lumière des lampes pendant la nuit et à l'obscurité pendant le jour, s'est épanoui le matin et fermé le soir, tandis qu'à l'air libre il s'ouvre le soir et se ferme le matin.

Ces expériences, qui montrent que les périodes de réveil et de sommeil des fleurs peuvent être modifiées ou interverties, sont très-intéressantes, et elles demanderaient à être répétées avec des intensités lumineuses plus grandes encore que celles des lampes dont a fait usage de Candolle, les différentes plantes étant inégalement impressionnables ; elles mettent en évidence l'influence que peut avoir la lumière dans ces mouvements qui ne sont probablement qu'un effet secondaire, mais en rapport avec les actions physiologiques sur lesquelles la lumière exerce son action.

Dutrochet (1) s'est occupé de ce sujet, et l'explication de ces mouvements des corolles lui a paru analogue à celle de l'inflexion des tiges vers la lumière. Il pense en effet que c'est par turgescence des cellules que l'épanouissement de la corolle a lieu, tandis que l'occlusion de la fleur ou la courbure en dedans est due au tissus fibreux. Ce serait donc à l'action alternativement prédominante de deux tissus organiques que le phénomène serait dû. Mais les mêmes observations peuvent s'appliquer ici comme à la flexion des tiges ; la courbure du tissu fibreux est-elle due à l'action de l'oxygène ?

Dutrochet cite comme preuve à l'appui l'expérience suivante : si l'on place sous la cloche d'une machine pneumatique des fleurs susceptibles de sommeil ou de réveil, et qu'on fasse le vide sous cette cloche, les fleurs conservent constamment celui des deux états qu'elles possèdent quand on les place sous la cloche. En vain les place-t-on au so-

(1) *Mémoires* déjà cités, t. 1, p. 469 et suiv.

leil, ou les laisse-t-on dans l'obscurité, le même effet est observé. Il a fait ces expériences avec les fleurs du *leontodon taraxacum*, du *sonchus oleraceus*, et du *convolvulus arvensis*. Ces fleurs avaient leurs pédoncules plongés dans l'eau ; mais dans ce cas les conditions physiologiques des plantes ne sont plus les mêmes, et dès lors leurs fonctions ne peuvent plus s'opérer comme à l'ordinaire.

M. H. Hoffmann (1) a fait plusieurs expériences pour soumettre des feuilles et des fleurs qui présentent les phénomènes de sommeil à l'influence des rayons de diverses couleurs. Seulement, il a opéré avec des verres recouverts de papier de couleur imbibés d'huile, c'est-à-dire d'après un moyen très-imparfait, puisqu'on ne peut affirmer quels sont les rayons différemment réfrangibles qui ont traversé ces écrans. Il a observé que les fleurs du *tolpis barbata* s'éveillent plus tôt sous l'influence de la lumière bleue et de la lumière jaune que de la lumière rouge; quant au sommeil, il se manifesta plus tôt sous l'action de la lumière rouge et de la lumière jaune que sous l'action de la lumière bleue ou que sous celle de la lumière du jour. Les rayons les plus réfrangibles paraîtraient donc retarder le sommeil et activer le réveil, et les rayons les moins réfrangibles au contraire prolonger le réveil et retarder le sommeil.

M. Hoffmann a observé qu'une forte lumière artificielle peut éveiller pendant la nuit les fleurs du *galanthus nivalis;* mais il a remarqué que d'autres fleurs placées dans l'obscurité ont manifesté des mouvements analogues à ceux qui se produisent à l'air libre. Des fleurs d'*œnothera lindleyana,* et du *tolpis barbata,* plongées sous l'eau, ont présenté à peu près les mêmes heures de sommeil et de réveil que dans l'air.

Ces alternatives de mouvement d'après M. Ch. Royer (2) dépendent de la turgidité de la corolle, et ce serait la face interne, surtout aux points situés près du tube ou de l'onglet, qui serait le siége du mouvement. En plaçant des plantes dans des conditions favorables de chaleur et d'humidité, il a pu empêcher le sommeil; ainsi des fleurs de *bellis perennis* exposées dans un four à la température de 25° sont restées épanouies pendant quatre jours et quatre nuits. Mais, de même que dans l'expérience des fleurs placées dans le vide, faite par Dutrochet, ces actions mettent la plante dans d'autres conditions physiologiques et n'excluent pas l'action de la lumière.

(1) *Ann. des sciences naturelles,* partie botanique, 3e série, t. 14, p. 310 et 330 (1850).
(2) *Bulletin de la Société botanique de France,* t. 12, p. 31 (1865).

*Feuilles.* — On a observé depuis longtemps que les feuilles de certaines plantes prennent pendant la nuit, par rapport aux branches, une position différente de celle qu'elles ont pendant le jour. On a cité, page 239, un passage de Pline qui tendrait à montrer que l'on avait remarqué très-anciennement quelques effets de ce genre ; dans le seizième siècle, V. Cordus et Garcias de Horto (1) parlèrent de ces changements, que le premier avait observés dans le glycyrrhiza et le second dans les folioles du tamarin; mais depuis le milieu du siècle dernier ce phénomène a particulièrement attiré l'attention des botanistes.

Bonnet (2), comme on l'a vu antérieurement, qui avait observé le phénomène si curieux du retournement des feuilles quand on les place momentanément, et par l'action d'un effort extérieur, de façon à ce que la partie supérieure soit située en dessous, chercha à expliquer ces effets, ainsi que la position des feuilles dans l'état de sommeil ou de réveil, par l'action calorifique due au rayonnement solaire : cette action, suivant lui, desséchait inégalement les surfaces des feuilles.

Linnée (3) entreprit des observations sur ce sujet, étudia les formes diverses sous lesquelles le sommeil se présente dans les végétaux, et sous ce rapport rangea ces derniers dans plusieurs classes. Il parvint, entre autres, aux conclusions suivantes :

1° Les jeunes plantes offrent des mouvements plus marqués que lorsqu'elles sont plus âgées.

2° L'absence seule de lumière cause le sommeil des feuilles, et le froid de la nuit n'en est pas cause, car dans les serres chaudes les plantes sont soumises à cette espèce de repos.

3° Les feuilles suivant les plantes se replient d'une manière différente.

Ainsi l'action de la lumière était bien reconnue, et il était admis que son absence donne lieu à la disposition des feuilles pendant la nuit.

La plupart des recherches faites depuis cette époque pour avoir l'explication du mouvement des feuilles ont porté sur les plantes qui présentent ce phénomène au plus haut degré et surtout sur la sensitive (*mimosa pudica*), dont les mouvements des feuilles et des tiges peu-

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 854.

(2) Bonnet, *Recherches sur l'usage des feuilles ;* Gœttingue (1754).

(3) *Somnus plantarum* (1755). — *Amœnit. academ.*, 4e vol., p. 333. — *Journal de physique*, t. 1er, p. 379 (1773).

vent être produits par un grand nombre de causes excitatrices. J. Hill (1) fit à ce sujet des recherches avec l'abrus (espèce de pois d'Égypte) et la sensitive. En plaçant ces plantes dans une pièce éclairée et en les approchant plus ou moins de la fenêtre, il parvint également à cette conclusion que la lumière seule est la cause de ce changement, et que ce que l'on appelle le sommeil des plantes n'est dû qu'à l'absence de lumière. Il ne chercha pas à expliquer l'effet produit, car il énonça simplement l'idée que le réveil était dû à l'excitation, par l'action lumineuse, des fibres qui existent dans le pétiole.

Lindsay (2), étudiant les changements de position des feuilles de la sensitive, fit voir que le renflement qui existe à la base du pétiole est le siége de la mobilité ; suivant lui, c'est même la partie supérieure seule qui agit, car l'ablation de la moitié inférieure n'empêche pas l'abaissement du pétiole pendant la nuit, ce qui montre que ce n'est pas la contraction de cette dernière partie qui est cause du phénomène.

De Candolle (3), lors de ses expériences sur le sommeil des fleurs, a soumis également des sensitives ainsi que d'autres plantes à l'action de la lumière de plusieurs lampes pour étudier son influence sur le mouvement des feuilles. Avec les sensitives les effets ont été très-nets et ont conduit aux conséquences suivantes :

1° En exposant pendant plusieurs jours des sensitives à la lumière des lampes pendant la nuit et à l'obscurité pendant le jour, dans les premiers temps ces plantes ont fermé et ouvert leurs feuilles sans règle fixe; mais au bout de quelques jours elles ont ouvert leurs feuilles le soir à l'instant où la lumière artificielle commençait à agir, et les ont fermées le matin, qui était l'heure où leur nuit commençait.

2° Des sensitives exposées à une lumière continue ont présenté, comme dans l'état ordinaire, des alternatives de sommeil et de réveil ; mais chacune de ces périodes était un peu plus courte qu'à l'ordinaire. L'accélération a été sur plusieurs pieds de une heure et demie à deux heures par jour.

3° Les mêmes plantes placées à l'obscurité continue ont offert des alternatives de sommeil et de réveil, mais très-irrégulières.

(1) *The sleep of plantes...*, Londres (1757), 2e édit. (1762). — *Journal de physique*, t. 1er, p. 377.

(2) *Biblioth. of the Royal Soc.*, juillet, 1790. — *Bulletin de la Société des nat. de Moscou*, t. 30, 2e partie (1857), p. 237.

(3) Déjà cité. *Mém. des Savants étrangers de l'Institut de France*, t. 1er. — *Physiologie végétale*, t. 2, p. 860.

Il a obtenu des effets analogues, quoique moins évidents, avec d'autres mimosas; mais avec quelques plantes il n'a pu observer aucune action : ainsi, il n'a pas pu modifier le sommeil des *oxalis incarnata* et *stricta*, ni par l'obscurité ni par la lumière continue des six lampes, qui suffisaient pour les autres expériences. L'action excitatrice de la lumière dépend donc évidemment du degré d'impressionnabilité des plantes, et les mêmes effets ne peuvent être obtenus dans diverses plantes que par des intensités lumineuses différentes.

On doit encore mentionner au sujet de l'action de la lumière sur la sensitive les observations de M. Daubeny (1), d'après lesquelles un certain degré d'intensité de lumière est nécessaire à la santé de la plante, qui, lorsqu'elle n'est soumise qu'à l'action des rayons bleus ou violets, perd sa sensibilité aussi promptement que si elle était soustraite à l'action de la lumière.

Dutrochet (2) a fait également sur ce sujet des expériences intéressantes, mais dans le but d'expliquer les mouvements produits par la lumière. Il a montré que c'est sur le renflement moteur ou sur le pétiole des folioles qu'agit la lumière pour déterminer le réveil par sa présence ou le sommeil par son absence.

L'expérience a été faite avec le haricot, qui est parmi les plantes indigènes celle dont la feuille offre le plus de facilité pour l'étude de ces phénomènes, en raison de la grosseur de ces renflements. Dans le sommeil, les folioles du haricot dirigent leur pointe vers la terre : leur plan est alors vertical; dans le réveil, le plan devient horizontal; cependant la nutation des feuilles tend à diriger leur face supérieure vers le soleil. Pour montrer que le limbe de la feuille n'a pas d'influence sur le phénomène de réveil ou de sommeil, Dutrochet a enlevé toute la partie membraneuse des folioles, en laissant seulement subsister une portion de leur nervure médiane, et les mouvements continuèrent d'avoir lieu.

Avec la sensitive il observa que dans le vide la plante resta éveillée; les feuilles du *robinia pseudo acasia* ayant été mises dans de l'eau aérée, les alternatives de sommeil et de réveil eurent lieu comme dans l'air, mais avec cette différence que le réveil fut incomplet et moins marqué que dans les conditions normales. D'après les mêmes principes que

(1) *Philosoph. transact.* (1836). — *Bibliothèque univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1, p. 388 (1836).

(2) *Mémoires* déjà cités, t. 1er, p. 497.

pour la flexion vers la lumière, Dutrochet pensa que ces effets tenaient aux actions diverses exercées sur le tissu cellulaire et sur le tissu ligneux : la turgescence du tissu cellulaire dans le pétiole, qui produit le réveil, serait donc liée aux effets de la respiration qui ne commence à s'exercer qu'au moment de l'action de la lumière; le soir, quand les phénomènes d'assimilation chimique diminuent, ce même tissu perdant une partie de sa turgescence, l'incurvation due au tissu fibreux l'emporterait ; de là le sommeil.

M. Ratchinski, dans les recherches citées précédemment page 251, s'est occupé également de cette question, et a opéré sur différentes plantes telles que les *chenopodium album*, *malva rotundifolia*, *impatiens glanduligera*, *lupinus*, *oxalis*, etc.; il a donné à peu près la même explication que Dutrochet.

M. Hoffmann, dont on a cité, page 256, les recherches sur le sommeil des fleurs, a observé les effets produits sur les feuilles placées dans des conditions semblables, et est arrivé aux mêmes conséquences, c'est-à-dire que les rayons les plus réfrangibles paraissent activer le sommeil et les moins réfrangibles prolonger l'éveil et retarder le sommeil; mais ces expériences sont à reprendre avec des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée, car ce phénomène, si ces conclusions sont exactes, paraîtrait tenir à la même cause que la flexion des tiges vers les sources lumineuses. M. Hoffmann a également vérifié que les mouvements dont il est question ici peuvent s'exécuter avec les plantes immergées comme lorsqu'elles restent dans l'air.

En terminant ce sujet on doit dire que le sommeil des feuilles n'a aucun rapport nécessaire avec celui des fleurs ; ainsi par exemple les fleurs d'un acacia voisin du latisiliqua s'ouvrent la nuit et se ferment le jour, tandis que les feuilles du même arbre se relèvent le jour et prennent la nuit la position du sommeil; l'épanouissement des feuilles pour cette plante est donc diurne, et celle des fleurs nocturne (1).

On voit en définitive que les mouvements des feuilles, comme ceux des corolles de certaines fleurs, sont influencés par la lumière, mais dans l'état actuel de la science, de même que pour la flexion des tiges, on ne saurait en donner d'explication complétement satisfaisante.

*Enroulement.* — Les mouvements dont il va être question paraissent moins directement liés à l'action lumineuse que les précédents; cepen-

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 862.

dant l'influence de cet agent est encore manifeste. On a vu plus haut, page 247, que Knight avait observé que les vrilles de la vigne vierge et du pois cultivé avaient une tendance à fuir la lumière, et que dès lors elles devaient se porter vers les corps opaques qui les avoisinaient et s'enrouler autour de ces corps. Ainsi Knight en présentant à ces vrilles un miroir qui leur renvoyait une vive lumière les déterminait à s'en éloigner. Si ce phénomène était général, on pourrait en inférer la cause de l'enroulement des tiges volubles ou volubiles, c'est-à-dire des tiges qui s'enroulent autour des obstacles comme les haricots, les pois, etc.; mais il n'en est pas ainsi, comme on va le voir.

M. Palm (1), qui un des premiers s'est occupé des plantes volubiles, en compte environ 600, qui se rangent en 34 familles différentes. Les tiges de ces plantes s'enroulent pour la plupart en tournant autour de leur support de gauche à droite; les autres suivent une direction contraire; dans l'un et l'autre cas le sens de l'enroulement est invariablement déterminé dans chaque espèce. Cependant, plusieurs plantes font exception, et donnent des tiges volubiles qui tournent indifféremment dans les deux sens; on peut citer comme exemple la douce-amère (*solanum dalcamara*), les loasa et *muehlenbeckia varians;* la bryone (*bryonia dioica*) offre ce phénomène qu'elle tourne en deux sens opposés à la base et au sommet, et change de direction au milieu de sa longueur. M. Palm, d'après l'observation des faits, a pu conclure que bien que certaines causes extérieures favorisent le phénomène de l'enroulement, cependant la lumière a une influence déterminante. A la même époque M. Mohl (2), en expérimentant sur le liseron des fenêtres (*ipomœa purpurea*) et sur le haricot, a vu la tige de ces plantes s'enrouler autour des corps dans l'obscurité comme à la lumière, et a été conduit à une conclusion opposée à la précédente.

Dutrochet (3) chercha à expliquer le phénomène de l'enroulement des plantes volubiles par un mouvement spontané et révolutif de l'extrémité de leurs tiges; comme la lumière, dit-il, les porte à fuir du côté le moins éclairé, elles se dirigent vers les supports ou vers les corps voisins, et le mouvement spontané révolutif dont est doué leur extrémité, combiné avec

(1) *Ueber das Winden*, etc.; Tubingue (1827). — De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 837 (1832).

(2) *Ueber den Bau und das Winden*, etc.; Tubingen (1827).

(3) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 17, p. 989 (1843); t. 19, p. 295 (1844).

celui par lequel elles fuient la lumière, les dirige en sens divers dans l'air où elles semblent chercher les corps solides autour desquels elles s'enroulent. L'explication de ce phénomène paraît du reste fort complexe, et l'existence de ce mouvement spontané et révolutif n'est pas complétement démontré; cependant, en dehors de toute hypothèse et avant même de chercher à rendre compte des différentes phases de l'enroulement, il faut examiner si la lumière exerce une influence déterminante et quelle est la limite de cette influence.

M. Ch. Darwin (1) a conclu de ses recherches que la lumière exerce une action sur le phénomène, car si l'on place des plantes volubiles dans une chambre, près d'une fenêtre, l'extrémité de leur tige, qui s'accroît lors de son mouvement révolutif qui la fait tourner autour de son support, met plus de temps pour décrire la demi-révolution pendant laquelle elle regarde le fond peu éclairé de la chambre que pour accomplir celle qui la maintient près de la fenêtre. Ainsi un *ipomœa jucunda* ayant fait en cinq heures vingt minutes un tour entier, le demi-cercle du côté de la fenêtre n'a pas exigé tout à fait une heure, tandis que l'autre n'a été parcouru que dans l'espace de quatre heures trente minutes.

M. Léon (2) a placé des plantes volubiles près de supports en verre, c'est-à-dire formés de matière transparente, ou bien composés d'un simple fil, et il a vu l'enroulement s'opérer; ce résultat ne montre pas que la lumière n'est pas nécessaire à la production du phénomène, seulement il indique que l'hypothèse de Knight ne saurait seule rendre compte des effets. Quant à la cause de l'enroulement, il l'attribue, comme Dutrochet, à des mouvements dus à un antagonisme entre la turgescence du tissu cellulaire et l'action par oxygénation du tissu fibreux, c'est-à-dire aux deux genres de réactions qui suivant Dutrochet sont également la cause des mouvements d'incurvation et de flexion des axes des plantes vers la lumière.

M. Duchartre (3) a fait varier les conditions d'éclairement de plusieurs plantes volubiles, et a montré le motif des divergences des conclusions opposées de MM. Palm et Mohl. Il a opéré d'abord avec l'igname de Chine (*diascorea Batatas*), plante qui peut végéter pendant longtemps à l'obscurité sans en souffrir notablement. Lorsque des pieds plantés en pots ont été en pleine végétation, il a placé les uns

(1) *Journal of the linnean Society*, t. 9, p. 1 (1865).
(2) *Bulletin de la Société de botanique de France*, t. 5, p. 351, 610, 624 679 (1858).
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 1142 (1865).

au milieu d'un jardin, les autres dans une cave entièrement obscure; en outre, il a pu faire passer successivement plusieurs pieds de l'obscurité à la lumière du jour. Dans tous les cas, les tiges d'igname ont perdu à l'obscurité la faculté de s'enrouler autour des baguettes servant de tuteurs et auxquelles il avait eu la précaution de les attacher afin de voir si, conformément aux idées contraires à l'influence lumineuse, l'irritation produite par le contact du corps étranger les déterminerait à s'enrouler; mais ce résultat n'a pas été observé, et dans l'obscurité elles sont restées non adhérentes aux tuteurs. En faisant passer les plantes à la lumière elles ont présenté une portion enroulée dans la partie de la plante qui s'était accrue pendant l'exposition au jour, mais en les rentrant dans l'obscurité elles ont poussé des tiges droites privées d'enroulement. Ainsi la lumière du jour est nécessaire à l'enroulement de cette plante.

Un pied de *mandevillea suavolens* dont l'extrémité a été placée dans un cylindre opaque en zinc a donné des pousses qui ont perdu la faculté de s'enrouler, tandis que sous l'influence de la lumière les nouvelles tiges ont présenté ce phénomène comme dans les conditions ordinaires.

On a dit plus haut que M. Mohl avait observé que l'*ipomœa purpurea* et le haricot présentaient le phénomène de l'enroulement dans l'obscurité; M. Duchartre en opérant avec un pied de la première plante a vu la tige placée dans un tuyau obscur, ou bien la plante étant dans une cave privée de lumière, s'enrouler aussi bien à l'obscurité qu'à la lumière.

Ces résultats intéressants montrent que parmi les plantes volubiles, les unes ne doivent leur enroulement qu'à la lumière, tandis que les autres ne paraissent pas éprouver d'influence; il serait intéressant de rechercher quels sont les éléments différemment réfrangibles qui exercent une action sur les premières plantes.

On doit rapprocher de ces effets l'enroulement des parties de certaines plantes que l'on a nommées des vrilles.

### § 4. *Aspiration, transpiration.*

La nutrition des plantes est un des phénomènes les plus importants de la vie végétale, et ne peut s'exercer sans l'influence de la lumière. Quelques plantes, il est vrai, croissent dans l'obscurité, mais elles sont

languissantes, étiolées, et, à l'exception peut-être de quelques cryptogames, ne peuvent parcourir ainsi toutes les phases de leur existence.

Bien que les réactions nombreuses qui ont lieu dans les tissus végétaux ne soient pas connues, les observations des expérimentateurs ont montré quels sont les éléments nécessaires à ces réactions ainsi que les produits qui en résultent, et comment l'atmosphère est modifiée par la présence des plantes qui y végètent.

Un des corps les plus essentiels est l'eau, qui s'infiltre dans les tissus, est aspirée par les racines, dissout et transporte les diverses substances, et dont les éléments peuvent être assimilés aux végétaux dans l'acte de la nutrition.

La force d'absorption que présentent les plantes est surtout influencée par la chaleur et par la lumière; sans un certain degré de température elle ne se produit pas, en l'absence de la lumière elle cesse d'avoir lieu. Les observateurs qui se sont occupés de ce sujet ont remarqué que les branches ou les plantes enracinées et chargées de feuilles, plongées par leurs parties inférieures dans l'eau, pompent beaucoup plus d'eau le jour que la nuit. Si l'on place dans ces conditions plusieurs plantes aussi semblables que possible, l'une à l'obscurité, l'autre à la lumière diffuse ou artificielle, une autre à la lumière solaire, on voit ces dernières plantes aspirer beaucoup plus d'eau que la première et d'autant plus que la lumière est plus vive, sans que cependant la succion soit nulle à l'obscurité (1).

Cette eau est exhalée en partie dans l'atmosphère et la lumière est une des causes qui agit avec le plus d'intensité pour produire ce phénomène. Hales, Guettard, Senebier ont observé que lorsqu'une plante est placée à l'obscurité totale, elle cesse de transpirer quoiqu'elle continue encore pendant quelque temps à absorber de l'eau, de sorte que son poids augmente un peu. Les lumières artificielles produisent le même effet que la lumière solaire, à l'intensité près bien entendu. On sait aussi que les feuilles et les fleurs se conservent plus longtemps fraîches dans l'obscurité qu'exposées à la lumière.

Il résulte de là que les plantes tenues à l'obscurité reçoivent de l'eau sans la verser dans l'atmosphère; cette eau n'étant pas fixée dans les tissus, elles tendent donc peu à peu à se trouver dans un état d'hydro-

(1) Hales, *statique des végétaux,* traduct. française, par Buffon (1735). — Guettard, *Mémoires de l'Académie des sciences,* t. 66 et 67 (1748 et 1749). — De Candolle, *Physiologie végétale,* t. 1, p. 81 et suiv.

pisie qui annonce la faiblesse des tissus et peut amener la chute des feuilles d'après les tiges. Les plantes qui reçoivent une trop faible lumière éprouvent des effets semblables, et en absorbant trop d'eau elles présentent des organes moins résistants que celles qui sont exposées au soleil, de sorte que les cellules et les fibres s'allongent sans prendre une consistance comparable à celle reçue dans des conditions convenables d'éclairement. Une vive lumière au contraire a pour effet de resserrer les tissus et de leur donner plus de densité et de solidité; la différence due à cette cause peut s'observer chez les individus de même espèce cultivés dans des climats différents, à des altitudes diverses, ou plus ou moins abrités.

De Candolle (1) distingue la transpiration insensible de l'exhalaison ou émanation aqueuse proprement dite; la première est cet effet lent qui tend à priver d'eau peu à peu toutes les parties cellulaires des végétaux, et qui s'exécute au travers de leurs tissus, sans pores apparents; elle est manifeste par la perte de poids des fruits charnus tels que les pommes, les raisins, ou par celle des tubercules; la seconde s'exerce par les organes revêtus de cuticule plus ou moins munie de stomates. Cette exhalaison est accompagnée de transpiration insensible, mais qui étant très-faible par rapport à elle peut être négligée. Il admet donc que, toutes choses étant égales d'ailleurs, l'émanation aqueuse de chaque partie est en raison du nombre des stomates; d'après cela les surfaces des feuilles qui en sont pourvues exhalent plus d'eau que celles qui en sont dépourvues, et les racines et les graines ne sont soumises qu'à la transpiration insensible.

Cependant les relations qui existent entre la quantité d'eau transpirée et le nombre des stomates ne sont pas nettement déterminées et la nature de l'épiderme influe beaucoup sur ce phénomène; en effet, les feuilles résistantes de divers arbres et arbustes portent un très-grand nombre de stomates et transpirent peu, tandis que les herbes transpirent beaucoup et ont un moins grand nombre de stomates.

Si l'on connaît les conditions les plus générales qui déterminent l'absorption de l'eau et la transpiration des plantes sous l'action de la lumière, on n'a pas étudié l'influence des rayons différemment réfrangibles d'une manière aussi précise que pour la flexion des tiges et la décomposition de l'acide carbonique. On peut citer cependant les ex-

(1) *Physiologie. vég.*, t. 1, p. 108.

périences faites par M. Daubeny (1) d'après lesquelles la puissance d'exhalaison et d'absorption de l'humidité est particulièrement influencée par les rayons les plus lumineux, c'est-à-dire par les rayons orangés, jaunes et verts, sous l'influence desquels, comme on le verra plus loin, les phénomènes de respiration sont également les plus actifs.

On doit dire encore, en terminant ce sujet, que la vapeur d'eau qui existe dans l'atmosphère ne paraît pas absorbée par les plantes pour s'en nourrir, ainsi que cela résulte des expériences de M. Duchartre (2), et que celle qui arrive dans le végétal peut provenir de l'eau qui mouille les feuilles mais résulte pour la presque totalité de celle qui est amenée par le mouvement circulatoire de la séve (3).

### § 5. *Respiration, fixation du carbone dans les végétaux.*

On attribue généralement à Ray (4) l'observation de ce fait que la lumière seule influe sur la couleur verte des plantes. Il a vu en effet que les plantes ne verdissaient pas quand elles végétaient sous un vase opaque et que leurs tiges alors s'allongeaient beaucoup; il s'était assuré que ce phénomène n'était dû ni à la privation de l'air ni à l'influence de la chaleur.

Bonnet, vers le milieu du siècle dernier, a beaucoup étendu ces observations; il les a variées, et a montré que sans l'action de la lumière les plantes étaient étiolées. Il fit des recherches intéressantes sur l'usage des feuilles (5), et observa le premier que placées sous l'eau elles se couvraient de bulles gazeuses, surtout à leur partie inférieure, quand on les exposait au soleil; lorsqu'elles cessaient d'être éclairées directement par les rayons solaires, les bulles cessaient de se montrer. Il pensait que ce gaz provenait de l'air interposé dans les plantes, et que la chaleur faisait dégager; il observa cependant que l'eau bouillie ne donnait pas de bulles gazeuses. Bonnet ne reconnut pas la cause de ces effets; cependant il venait de découvrir un fait constatant l'influence que la lu-

(1) *Transact. philosoph.*, t. 126, part. 1 (1836). — *Bibliothèque univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1, p. 388.

(2 *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 428 et 790.

(3) Voir aussi pour la transpiration et l'exhalaison aqueuse, J. Sachs, *Handbuch der physiologischen botanik*, p. 228. — W. Schumacher, *Die physik in ihrer anwendung auf agricultur, etc.*; Berlin (1867).

(4) *Historia gener. plantarum*, t. 1er, livr. 1 (1686).

(5) *Recherches sur l'usage des feuilles*, page 24 et suiv. (1754).

mière exerce sur la vie végétale, et qui a été le point de départ des recherches importantes sur la nutrition des plantes faites à la fin du siècle dernier.

Une vingtaine d'années après, Priestley (1) annonça que la végétation d'une plante à la lumière devient plus vigoureuse dans un air vicié par la respiration d'un animal ou par la combustion d'une bougie, et qu'elle lui rend de nouveau sa pureté primitive et sa faculté d'entretenir la flamme. Il montra donc que les plantes émettaient du gaz oxygène sous l'influence des rayons lumineux. Cette observation révélait une des grandes lois de la nature; aussi fut-elle accueillie avec enthousiasme, malgré que Priestley n'eût point remonté à la cause du phénomène.

Ingenhouz (2) fit de nombreuses expériences, montra que cette action des plantes n'appartenait qu'aux parties vertes, et qu'elle ne s'exerçait que sous l'influence de la lumière solaire. A peu près à la même époque, Senebier (3) prouva que les feuilles et les parties vertes absorbaient du gaz acide carbonique de l'atmosphère et éliminaient du gaz oxygène, et que c'était par cette action qu'avait lieu l'épuration de l'air vicié par les animaux. Il observa en outre que des feuilles exposées au soleil, dans de l'eau ordinaire ou de l'eau légèrement imprégnée d'acide carbonique, produisaient du gaz oxygène aussi longtemps qu'il restait du gaz acide carbonique dans l'eau. Il vit que lorsque ce gaz était épuisé et que l'on plaçait les feuilles dans de l'eau distillée, elles ne produisaient pas une quantité d'air plus grande que celle qui pouvait être interposée dans leur propre volume.

On voit que la nature du phénomène était mise en évidence, mais il restait à déterminer le rapport entre le volume du gaz acide carbonique absorbé et celui de l'oxygène exhalé. Ce sujet fut étudié avec le plus grand soin par Th. de Saussure (4), qui montra que dans ses expériences le volume de l'oxygène dégagé demeurait inférieur à celui de l'acide carbonique absorbé, mais qu'en même temps une portion de l'oxygène retenu par la plante était remplacée par de l'azote exhalé ; il pensa que ce gaz azote provenait de la substance même de la plante, et fut conduit à cette conclusion, que l'oxygène dégagé provenait de l'acide carbo-

(1) *Phylosoph. transat* (1772). — *Priestley's Experim* etc., 2e édit. (1775).

(2) *Expériences sur les végétaux;* Paris (1780).

(3) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière;* Genève, 1782. — *Expériences sur l'action de la lumière solaire dans la végétation;* Genève, 1788.

(4) *Recherches chimiques sur la végétation.* Paris (1804).

nique absorbé. Ainsi ce grand fait physiologique de l'influence de la lumière dans la nutrition des plantes était définitivement établi.

Ces expériences ont été répétées et variées dans différentes conditions, comme on va le voir, et actuellement il est démontré que l'on observe seulement le résultat final de réactions fort complexes dans lesquelles il faut faire intervenir non-seulement le gaz acide carbonique et l'oxygène qui se trouvent dans l'atmosphère, mais encore l'eau ainsi que les matières transportées par le mouvement de la séve.

Il faut donc examiner quelles sont les parties du rayonnement lumineux qui sont nécessaires pour produire la coloration verte, c'est-à-dire pour donner lieu à l'émission de gaz oxygène sous l'influence de la lumière; ensuite, et successivement, quel est le rôle de l'acide carbonique, de l'oxygène, de l'azote, et quelles sont les quantités de ces gaz qui sont absorbées ou exhalées.

On vient devoir que la lumière est nécessaire à la vie végétale, et que les plantes qui germent et croissent à l'obscurité sont étiolées et présentent une couleur jaunâtre, qui ne prend le ton vert que sous l'action de la lumière. Cette coloration verte peut être également donnée par une lumière artificielle; ainsi Tessier (1) observa que des feuilles verdissent sous l'influence des lampes comme sous celle de la lumière de la lune, et De Candolle a remarqué la même action en colorant en vert des plantes par l'action prolongée des lampes qui lui servaient à étudier les mouvements des pétales et des feuilles lors de leur sommeil ou de leur réveil. M. H. Mangon (2), en se servant de la lumière électrique dont l'action est si vive, a pu également verdir de jeunes plants de seigle. Du reste, il n'y a que la composition et l'intensité qui diffèrent dans les diverses sources lumineuses, et les rayons de même longueur d'onde, quelle que soit leur origine, produisent les mêmes effets.

Senebier (3) a fait végéter des plantes telles que des chicorées, des épinards, des pois, sous des écrans colorés de différentes nuances, mais la composition de la lumière transmise n'a pas été déterminée, de sorte que l'on ne peut arriver à une conclusion certaine au moyen des résultats qu'il indique. Il en est de même à l'égard des expériences faites par Tessier en exposant des plantes derrière des carreaux de verre coloré.

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 102, p. 154 (1783).
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 53, p. 243 (1861).
(3) *Mémoires physico-chimiques, etc.*, t. 2, p. 55 (1782).

M. Daubeny (1), dans un travail dont il a déjà été question, a examiné l'influence des rayons qui ont traversé des écrans de verre coloré sur l'émission de gaz oxygène et la décomposition de l'acide carbonique par les plantes, mais sans déduire aucune conclusion générale de ses recherches.

M. Hunt, comme on l'a dit antérieurement, page 236, en examinant l'action des rayons qui avaient traversé des milieux colorés sur la germination et l'accroissement des jeunes plantes, avait observé que la lumière paraissait nuisible à la germination des graines et à l'accroissement des jeunes plantes. Dans un autre travail (2), il remarqua que des plantes croissant sous l'influence d'une lumière ayant traversé des milieux de couleur bleue ou rouge contenaient plus d'eau que celles qui avaient cru sous l'influence des rayons jaunes ou verts ; la formation de la fibre ligneuse avait suivi une progression inverse, et était plus grande dans les plantes qui avaient végété sous les rayons jaunes et verts. Il a cité les résultats suivants comme indiquant la proportion de fibre ligneuse formée dans une même espèce de plantes pendant le même temps :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dans la lumière | bleue | les plantes étaient composées de | 7,16 | pour 100 de fibre ligneuse. |
| — | rouge | — | 7,25 | — |
| — | vert | — | 7,60 | — |
| — | jaune | — | 7,69 | — |

Ainsi les rayons les plus lumineux jaunes et verts étaient ceux qui avaient donné le maximum d'effet.

M. Hunt cite un fait qui semblerait en contradiction avec celui-ci : ayant exposé de jeunes plants bien vigoureux à l'influence des rayons du spectre, ils périrent en peu de temps sous l'action de la lumière jaune ; leur mort fut lente à venir sous l'influence du vert, et ils ne prospérèrent que sous les rayons rouges et bleus. Mais il faudrait savoir si l'activité de la lumière jaune et verte n'était pas trop grande pour les jeunes plants, et en outre si les conditions de température et d'humidité étaient les mêmes partout ; on ne saurait donc infirmer par ce fait les résultats précédents.

(1) *Philosophic. transat*, t. 126, 1836, 1er partie. — *Biblioth., univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1er, p. 388 (1836).

(2) *Biblioth. univ. de Genève*, 2e série, t. 53, p. 374.

M. Gardner (1) a opéré avec les rayons du spectre solaire ; il a semé différentes graines et principalement des graines de navet, et les a laissées se développer dans l'obscurité jusqu'à ce qu'elles eussent atteint de 5 à 7 centim. de longueur. En plaçant ces semis dans des boîtes exposées aux rayons différemment réfractés d'un spectre, il a pu juger des résultats obtenus.

Il a reconnu que la couleur verte donnée par les rayons aux petites plantes étiolées a été la plus prononcée dans la boîte exposée aux rayons jaunes. Dans ces expériences, l'espace de temps le plus court qui a suffi pour verdir un semis de navets a été, sous l'action des rayons jaunes, de deux heures ; souvent il a fallu six heures et même davantage. On conçoit que ce temps dépend de l'intensité de la lumière incidente. La couleur verte ainsi obtenue est assez persistante ; un séjour de soixante heures dans l'obscurité n'a pas suffi pour l'altérer.

M. Gardner a trouvé que dans une expérience il a fallu les temps suivants pour donner la même nuance de vert aux plantes renfermées dans différentes boîtes exposées aux rayons du spectre :

| | Heures. |
|---|---|
| Rayons orangés. . . . . | 4 $\frac{1}{2}$ |
| Rayons jaunes. . . . . | 3 $\frac{1}{2}$ |
| Rayons verts. . . . . | 6 |

Au bout de dix-sept heures et demie, le semis exposé aux rayons bleus avait atteint une nuance de vert beaucoup plus faible.

Ainsi la partie la plus lumineuse de l'image prismatique produit la coloration verte des plantes avec le plus d'intensité ; c'est également sous l'influence de ces rayons, comme on va le voir, que se produit le plus grand dégagement de gaz oxygène.

Les expériences suivantes de M. Draper, faites avec le spectre, indiquent quelles sont les parties les plus actives de l'image prismatique pour opérer le dégagement de gaz oxygène des plantes (2). Ayant réuni des brins d'herbe, il les plongea pendant plusieurs jours à l'obscurité dans de l'eau chargée d'acide carbonique, afin d'en chasser tout l'air adhérant à leur surface. Il remplit ensuite avec de l'eau pure chargée d'acide car-

(1) *Philosoph. magasine*, janv. (1844). — *Biblioth. univ. de Genève..*, t. 49, p. 376.
(2) *Philosoph. magasine*, sept. (1844). — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 11, p. 214.

bonique sept tubes de verre ayant chacun 13 millim. de diamètre et 18 centim. de longueur ; il les renversa sur une petite cuve pleine du même liquide, et il plaça dans la partie supérieure de chacun d'eux le même nombre de tiges d'herbes en ayant soin qu'elles fussent aussi semblables que possible les unes aux autres. Tous les tubes furent disposés verticalement et parallèlement l'un auprès de l'autre dans la cuve à eau.

Il plaça alors l'appareil de manière à ce qu'un spectre lumineux, rendu fixe par la réflexion d'un faisceau de rayons solaires sur un héliostat, tombât sur les parties des tubes qui contenaient les tiges, et de façon à ce que chacun d'entre eux occupât une étendue du spectre présentant une coloration bien déterminée. Au bout de quelques minutes, les tubes sur lesquels tombait la lumière orangée, jaune et verte, commencèrent à dégager de petites bulles de gaz, et au bout d'une heure et demie la quantité en fut assez considérable pour être mesurée. Voici les résultats des deux expériences faites de cette manière :

| Couleur de la lumière incidente. | Volume du gaz. 1re expérience. | 2e expérience. |
|---|---|---|
| Rouge foncé | 0,33 | » |
| Rouge et orangé | 20,00 | 24,75 |
| Jaune et vert | 36,00 | 43,75 |
| Vert et bleu | 0,10 | 4,10 |
| Bleu | » | 1,00 |
| Indigo | » | » |
| Violet | » | » |

On voit que les rayons qui produisent la décomposition de l'acide carbonique sont les rayons compris entre le rouge et le bleu, et que le maximum d'action a lieu dans le jaune, c'est-à-dire là où se trouve le maximum de lumière dans le spectre lumineux ; les rayons rouges extrêmes ainsi que les rayons bleus et violets ne donnent pas lieu à cette réaction. Ces expériences viennent donc à l'appui de ce qui a été dit plus haut.

M. Draper a répété les mêmes expériences en se servant d'écrans colorés qui ne laissent passer que des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée : ayant pris trois tubes disposés comme les précédents, ils les exposa simultanément à l'action de la lumière solaire, le premier

à la lumière libre, le deuxième sous un écran rempli d'une dissolution de bichromate de potasse qui ne laisse passer que le rouge, l'orangé et le jaune vert du spectre ; le troisième sous un écran de sulfate de cuivre ammoniacal ne laissant passer que la partie la plus réfrangible de l'image, prismatique, depuis la raie F du bleu jusqu'au delà du violet. Il a obtenu pour les volumes de gaz dégagé les résultats suivants :

| | |
|---|---|
| Lumière libre. . . . . | 4,75 |
| Écran de bichromate de potasse. . . . . | 4,55 |
| Écran de sulfate de cuivre ammoniacal. . | 0,75 |

Les rayons actifs pour produire le dégagement d'oxygène dans les plantes sont donc loin d'avoir la réfrangibilité de ceux qui influencent les sels d'argent ou d'or, car ces dernières substances sont impressionnées au contraire dans le bleu et le violet, comme on la vu antérieurement, page 82 et suivantes.

M. Draper, qui a soumis les gaz dégagés à l'analyse, a vérifié que dans les différents tubes l'oxygène n'est pas pur, et se trouve mélangé d'une certaine quantité d'azote, qui est très-variable suivant les plantes, et peut aller jusqu'aux trois cinquième du volume total du gaz ; du reste on reviendra plus loin sur ce sujet.

On peut citer encore comme se rapportant à l'action des rayons différemment réfrangibles les expériences faites par MM. Cloëz et Gratiolet sur les plantes aquatiques submergées (1), lesquelles sous l'influence de la lumière dégagent une forte proportion d'oxygène sans qu'il y ait à l'obscurité émission d'acide carbonique. Ayant placé des tiges garnies de feuilles de *potamogeton perfoliatum* dans des flacons remplis d'eau contenant de l'acide carbonique, ils ont exposé ces flacons sous des cages de verre à l'action de la lumière solaire ; ils ont fait usage d'une cage en verre blanc, d'une autre en verre blanc dépoli, et de cages en verre jaune, rouge, vert et bleu.

Les résultats des expériences ont permis de conclure que le gaz recueilli, qui est un mélange d'oxygène, d'azote et d'acide carbonique, a une composition variable, et qu'il est d'autant plus riche en oxygène que l'action lumineuse a été plus active. Ils montrent également que le maximum d'action a eu lieu sous le verre blanc dépoli ; l'effet produit sous le verre jaune vient ensuite, puis celui qui a été observé sous le

(1) *Ann. de chimie de physique*, 3e série, t. 32, p. 41 (1851).

verre blanc transparent, celui produit sous le verre rouge, sous le verre vert, et en dernier lieu sous le verre bleu. Si l'on a égard à la réfrangibilité des rayons transmis au travers des verres colorés, on reconnaît que le phénomène présente la même marche que dans les expériences précédentes, et que les rayons les moins réfrangibles agissant le plus vivement, les rayons bleus et violets n'exercent que peu ou point d'influence.

M. Guillemin (1) a également examiné l'influence des différents rayons du spectre solaire sur la formation de la matière verte, et s'est placé dans des conditions telles qu'il avait une intensité assez grande des divers rayons. Il s'est proposé de rechercher si l'action qui a lieu avec le plus d'énergie dans l'orangé et le jaune se prolongeait au delà des rayons visibles soit du côté du rouge soit au delà du violet. Il a fait usage de prismes de quartz et de sel gemme, afin d'agir avec des prismes qui soient transparents pour les rayons de ces réfrangibilités, les premiers donnant l'ultra-violet et les seconds l'infra-rouge prismatique (voir pages 110 et 30).

Les plantes sur lesquelles il a opéré étaient des semis d'orge, dont les tigelles verdissent rapidement à la lumière quand leur germination a eu lieu dans l'obscurité. Dans ces expériences, au bout de six ou huit heures de l'action du spectre, les feuilles d'orge éclairées par les rayons ultra-violets ont présenté une teinte verte très-visible, mais moins intense que celle qui se développe sous l'influence des différents rayons colorés; les autres plantes ont indiqué un maximum d'action dans le jaune, comme on l'avait déjà reconnu antérieurement. Ainsi les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire ne sont pas dépourvus de la propriété de verdir les feuilles.

Il a observé des effets analogues dans le commencement de la partie infra-rouge du spectre : deux expériences faites au mois d'août, de huit heures du matin à cinq heures du soir, avec un prisme de sel gemme, ont montré qu'à partir du développement maximum de la matière verte dans le jaune et l'orangé l'action décroît rapidement dans le rouge extrême, dont elle dépasse les limites, et s'étend dans la région infra-rouge à une distance de la raie A égale à l'intervalle du rouge extrême au jaune.

M. Guillemin a conclu de ses expériences que si la matière verte se forme principalement sous l'influence des rayons les plus lumineux du

(1) *Ann. des sciences naturelles*, 4e série, partie botanique, t. 7, page 154.

spectre, cependant elle peut avoir lieu dans les parties de cette image qui n'impressionnent que peu ou point la rétine. Si même l'on prolongeait la courbe des intensités lumineuses (voir page 143) d'une part jusqu'aux derniers rayons de l'ultra-violet, d'autre part jusque dans l'infra-rouge près de la région où se trouve le maximum de chaleur, sans l'abaisser brusquement au delà du rouge et du violet, elle représenterait approximativement en chacun de ses points l'aptitude relative de chaque rayon à déterminer la production de la matière verte.

M. Guillemin a fait remarquer que les feuilles des végétaux étiolés verdissent plus promptement quand elles sont exposées à la lumière diffuse de l'atmosphère que lorsqu'elles sont frappées par les rayons solaires. Il a annoncé également que les rayons rouges, orangés, jaunes, verts et bleus, agissent plus rapidement que les rayons solaires directs; ainsi les rayons jaunes d'un spectre intense se sont montrés aussi actifs que la lumière diffusée par l'atmosphère correspondant à toute la moitié nord de la voûte céleste; dans ces rayons, il suffisait d'une demi-heure pour la production d'une teinte verte très-appréciable. Ces résultats demandent à être bien constatés, et il faudrait s'assurer si les feuilles et les tiges des végétaux qui reçoivent l'influence de la lumière ne se dessèchent pas inégalement pendant l'action des divers rayons; si les conditions hygroscopiques restaient les mêmes, ces effets indiqueraient peut-être des actions inverses produites dans quelques parties du spectre solaire, sans quoi on ne pourrait expliquer cette action moindre des rayons réunis que celle de chacun des rayons isolés.

Les résultats cités antérieurement ne sont pas en contradiction avec l'observation de la coloration verte des jeunes plantes dans l'ultra-violet et l'infra-rouge, car la position du maximum d'action est sensiblement la même dans ces diverses séries d'expériences, et se trouve dans l'orangé et le jaune prismatique, mais l'extension plus grande des effets dans les autres parties du spectre provient de l'intensité avec laquelle les rayons ont agi et de la durée de l'expérience; d'après ce que l'on sait sur les effets chimiques produits sous l'influence de la lumière, il est facile de concevoir que ces effets puissent s'étendre de chaque côté de la position du maximum de coloration.

En ce qui concerne le dégagement du gaz oxygène par les feuilles insolées quand elles sont placées sous l'eau contenant de l'acide carbonique, on peut se rendre compte du motif pour lequel, dans les expériences de M. Draper, il n'avait pas lieu dans les rayons autres que

les rayons les plus lumineux : comme ce dégagement ne se produit que sous l'action directe des rayons solaires et nullement sous celle de la lumière diffuse, bien que celle-ci influe sur la plante mais avec une énergie d'action insuffisante pour opérer le dégagement, il n'y a donc que les rayons les plus actifs du spectre lumineux qui puissent le présenter; mais comme la coloration des plantes a lieu sous l'action des rayons diffusés comme sous l'influence des rayons directs, elle peut se manifester dans des rayons du spectre où le dégagement de gaz n'est pas appréciable. Il en est de même des effets analogues observés au moyen des écrans colorés.

M. J. Sachs (1) a fait germer et végéter des plantes sous l'influence d'écrans colorés formés par des cylindres concentriques entre les surfaces desquels se trouvaient des liquides colorés; ces liquides étaient du bichromate de potasse et du sulfate de cuivre ammoniacal, qui donnent, le premier les rayons rouges, orangés et jaunes, et le second les rayons bleus, violets et ultra-violets. Il avait pour but d'examiner comment se développent les plantes quand elles végètent étant ainsi éclairées par ces écrans.

Il a reconnu qu'après la sortie des germes de la terre le développement se fait toujours plus rapidement et mieux à la lumière orangée qu'à la lumière bleue, et que sous l'influence de celle-ci les plantes exigent quatre à six jours de plus pour développer les cotylédons foliacés; elles restent aussi plus petites. Ainsi les graines germées du lin cultivé (*linum usitatissimum*) et de la moutarde blanche (*sinapis alba*) donnent des tigelles qui deviennent sous l'influence de la lumière orangée deux fois plus grandes qu'à la lumière bleue, mais sans atteindre le développement acquis à la lumière extérieure. A la lumière bleue le développement s'arrête quand les jeunes plantes ont consumé la matière contenue dans la graine, et comme cela aurait eu lieu dans l'obscurité. Sous la lumière orangée, au contraire, il se forme plusieurs petites feuilles. D'après ces résultats, les plantes végétant sous la lumière bleue et violette sont donc étiolées.

Si l'on veut comparer entre eux les différents résultats dont il vient d'être question, on peut remarquer que s'ils s'accordent pour indiquer quels sont les rayons les plus efficaces; cependant quelques-uns semblent contradictoires, et surtout ceux qui sont obtenus au moyen

(1) Botanische Zeitung (1864), p. 353, 362, 369.

des écrans colorés ; il peut se faire que cela tienne aux conditions dans lesquelles se sont placés les opérateurs, et qui sont loin d'être les mêmes : s'il s'agit de la coloration en vert des végétaux, l'action paraît devoir s'étendre à presque tous les rayons du spectre, mais à des degrés très-différents; s'il s'agit de la décomposition de l'acide carbonique et du dégagement de l'oxygène par les feuilles plongées sous l'eau, comme on l'a dit plus haut, les rayons rouges, orangés, jaunes et verts paraissent agir presque seuls; mais si l'on examine quel peut être le développement des plantes pendant un certain temps, il peut se faire qu'une certaine intensité lumineuse soit nécessaire, et que dès lors des rayons qui agissent très-faiblement pour produire ces réactions n'aient pas une intensité suffisante pour que la nutrition des plantes puisse s'opérer; le développement de celles-ci doit donc avoir lieu comme sous l'influence d'une lumière diffuse très-faible, c'est-à-dire presque comme à l'obscurité.

On doit également remarquer que sous les écrans colorés exposés au soleil ou à la lumière diffuse l'intensité des rayons est loin d'être la même, et que les effets ne sont pas comparables à ceux qui sont observés dans les parties du spectre de même nuance ; d'un autre côté, des rayons infra-rouges et ultra-violets peuvent être transmis, de sorte que les plantes ont pu se trouver dans des conditions diverses de température et d'humidité, qui ont pu exercer une influence presque aussi grande sur les résultats observés que les différences d'intensité des rayons actifs.

Je citerai encore les résultats observés par M. Cailletet (1) en raison d'une différence dans les effets produits avec les écrans colorés en vert : ayant mesuré la quantité d'acide carbonique absorbée par des feuilles exposées à l'influence des rayons solaires dans des mélanges d'acide carbonique et d'air, sous des cloches en verre coloré, il a observé des résultats analogues avec les verres blancs, jaunes, rouges, bleus et violets ; il y a eu absorption plus ou moins grande d'acide carbonique et émission d'oxygène ; l'action, vive sous les verres blancs et jaunes, a été plus faible sous le verre rouge et nulle sous les verres bleus et violets. Mais il a remarqué que sous la cloche en verre vert dont il s'est servi non-seulement l'acide carbonique n'a pas été décomposé, mais il y a eu émission d'une légère quantité de ce gaz comme si la plante eût été dans l'obscurité; il a annoncé, d'après cela, que la lumière

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 65, p. 322 (1867).

verte aurait la propriété de produire rapidement l'étiolement de la plante.

Ces résultats étant opposés à ceux qui ont été observés au moyen de la coloration verte des végétaux, et par l'émission de l'oxygène sous l'eau, ainsi qu'à ceux dont je vais parler, il faudrait bien connaître toutes les conditions diverses dans lesquelles l'auteur s'est placé et quelle est la cause de cette production d'acide carbonique qui est venu se mélanger aux gaz ambiants; puis il faudrait aussi connaître quelle est le dégré de transparence des écrans verts dont il a fait usage. On doit remarquer que la chlorophylle étant verte par transparence, elle absorbe une partie des rayons de couleur complémentaire, c'est-à-dire principalement les rayons orangés et rouges, et que ce sont les rayons absorbés qui dans les plantes doivent agir pour opérer la décomposition de l'acide carbonique; mais une partie des rayons traversent encore une épaisseur déterminée de cette substance, et dès lors doivent conserver une activité chimique en rapport avec leur intensité, car l'intensité et la réfrangibilité déterminent seules les réactions qu'un faisceau de lumière peut produire. Il n'y aurait donc que dans le cas d'une opacité absolue, où l'on aurait une absorption totale de la lumière incidente, et où aucune action ne serait transmise.

J'ai pensé à me servir comme écran d'une dissolution alcoolique de chlorophylle, et à agir sur des plantes avec les rayons qui avaient traversé une épaisseur déterminée de cette matière (1).

Examinons d'abord comment la chlorophylle absorbe les rayons solaires : quand on place un écran plein d'une dissolution de chlorophylle sur la route d'un faisceau de rayons lumineux avant sa réfraction dans un prisme, et qu'on examine le spectre formé, si la teinte de l'écran est claire, on distingue plusieurs bandes noires qui traversent l'image prismatique et qui indiquent un pouvoir d'absorption inégal de cette matière sur les différents rayons réfrangibles. Toute la partie bleue, violette et ultra-violette au delà de F est arrêtée, et l'on sait, comme on l'a vu dans le I^er^ volume, page 319, que dans ces rayons elle donne lieu à un effet de phosphorescence très-curieux. Parmi ces bandes, l'une, située

(1) On forme aisément une dissolution de chlorophylle en faisant bouillir plusieurs fois dans l'eau des feuilles qui contiennent beaucoup de matière verte; les épinards sont dans ce cas. On rejette l'eau, et quand on a enlevé les matières solubles on exprime le résidu, et après l'avoir desséché suffisamment, on le traite par l'alcool, et on filtre la dissolution. On peut avoir ainsi cette dissolution plus ou moins concentrée.

de B à C, dans l'orangé rouge, est très-foncée, et il est remarquable de voir que ces rayons orangés qui sont fortement absorbés sont ceux qui paraissent les plus efficaces pour opérer la fixation du carbone ; plusieurs autres sont comprises entre C et F. Entre A et B on remarque un espace rouge très-vif, indiquant que les rayons de cette réfrangibilité traversent l'écran de chlorophylle sans absorption bien notable. Un écran plus foncé de cette substance augmente l'épaisseur des bandes et diminue l'intensité du spectre comprise entre B et F, et quand l'épaisseur de la couche de dissolution de chlorophylle est suffisante, l'écran paraît rouge, ne transmettant plus que la partie extrême la moins réfrangible du spectre lumineux (1).

Il serait intéressant de rechercher si dans le spectre solaire il y a des effets de coloration des plantes ou d'émission d'oxygène plus grande dans certaines régions que dans les parties voisines, c'est-à-dire si pour ces effets physiologiques on observe des maxima et des minima d'action comme lors de certaines réactions chimiques telles que celles exercées sur les sels de cuivre (page 96) et sur les sels de fer ; dans ce cas, il faudrait examiner si ces espaces auraient des rapports avec les positions des bandes que la chlorophylle peut produire. Cela n'est pas impossible, et jusqu'ici on n'a pu observer si l'action du spectre diminuait graduellement d'intensité à partir du maximum, car on s'est servi de plantes qui recevaient des faisceaux refractés trop larges, au lieu de spectres qui seraient produits par des faisceaux lumineux suffisamment étroits.

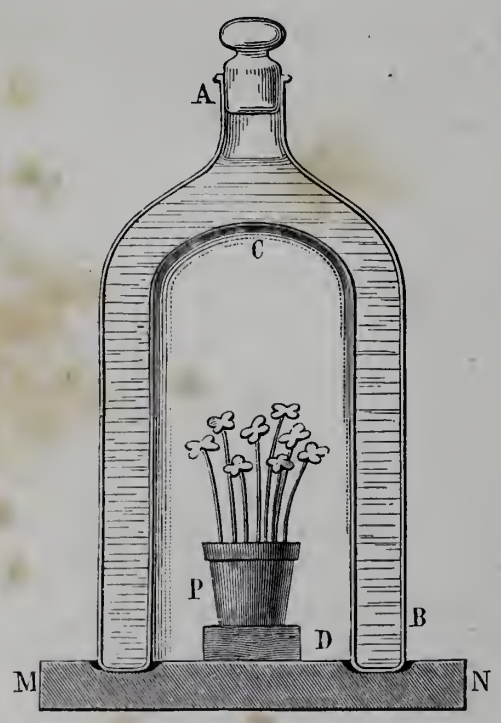


Fig. 60.

Afin d'utiliser l'action de la chlorophylle comme écran, j'ai fait usage de cloches représentées fig. 60, qui permettent de soumettre des plantes à l'influence de rayons d'une réfrangibilité déterminée. A B est un grand flacon dont le fond se relève en forme de cloche C D, de façon à constituer un appareil à double fond, les parois intérieures et extérieures étant partout à peu près à la même distance. La

(1) Voir également *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 38, p. 498.

partie supérieure A est munie d'une fermeture à l'émeri, et comme c'est la seule ouverture du vase, en versant dans l'intérieur un liquide coloré, ce liquide agit comme écran et tamise la lumière qui pénètre dans la cloche; on peut donc placer en P des plantes ou des appareils destinés à être soumis à l'influence des rayons lumineux. Cette cloche repose sur une base en bois MN portant une rainure dans laquelle entre la circonférence de la base, afin d'éviter le passage de la lumière entre le support et cette base. Les cloches dont j'ai fait usage avaient à l'intérieur 12 à 18 centimètres de diamètre et de 25 à 35 centimètres de hauteur de C en D; l'épaisseur entre D et B était de 3 centimètres.

J'ai employé comme liquides une dissolution saturée de bichromate de potasse, du sulfate de cuivre ammoniacal et une dissolution de chlorophylle; cette dernière était assez concentrée pour paraître verte sombre, et sous l'épaisseur de 3 centimètres représentait assez bien la nuance du vert foncé à bouteille ordinaire; sous une épaisseur de 12 centim., elle semblait rouge. On pourrait aisément se servir d'autres liquides.

J'ai fait végéter dans des pots à l'obscurité des graines de navet hâtif et d'orge; quand les tigelles de navet ont eu 5 centimètres de hauteur, et l'orge de 5 à 10 centimètres, ces plantes ont été mises en expérience en les plaçant sous des cloches semblables, mais remplies de liquides différents, à la lumière diffuse, puis un autre jour à la lumière solaire. A la lumière diffuse, sous la cloche verte de chlorophylle, les folioles des semis de navet après six heures d'action avaient une teinte verte bien déterminée; après seize heures, c'est-à-dire après deux jours d'action de huit heures chaque, les folioles étaient tout à fait vertes. Cette action a paru presque aussi marquée que sous la cloche jaune orangé; sous la cloche bleue, elle était moins vive. Au soleil, en trois heures les semis avaient verdi d'une manière bien manifeste, et après six heures la coloration était presque semblable à celle des tigelles des mêmes plantes qui avaient végété pendant le même temps à la lumière du jour. L'orge s'est comportée de la même manière que les tigelles de navet; mais pour étudier l'apparition de la matière verte les semis de navet sont préférables, car les folioles des plants venues à l'obscurité sont jaunes sans traces de vert, tandis que les jeunes tiges d'orge étiolées sont d'un jaune un peu verdâtre.

On a placé deux feuilles de lierre dans de l'eau aérée renfermée dans une éprouvette, et cette éprouvette renversée dans une petite

cuve a eau a été placée sous la cloche colorée en vert par la dissolution de chlorophylle. Après six heures de l'action solaire, il y a eu environ 2 centimètres cubes de gaz réuni au haut de l'éprouvette. Les effets observés dépendent bien entendu du degré de transparence de l'écran, et s'il était plus foncé les résultats seraient différents. On pourrait aisément se servir de ces cloches pour étudier les différentes réactions opérées par la lumière sur les plantes, car la base MN peut permettre l'introduction de tubes qui serviraient à la circulation des gaz dans l'intérieur des appareils.

Ainsi les résultats obtenus avec l'écran vert formé par la dissolution alcoolique de chlorophylle, comme avec les écrans de verre vert des observateurs dont on a cité plus haut les recherches, et contrairement à l'observation de M. Cailletet, conduisent à la même conclusion, et l'on doit considérer les rayons de la partie orangée jaune et verte du spectre comme agissant plus ou moins vivement pour produire la coloration verte des plantes et pour décomposer l'acide carbonique suivant le degré de transparence des écrans dont on fait usage.

On voit, en résumé, que la partie du rayonnement qui donne lieu au dégagement d'oxygène et à la coloration verte des végétaux est principalement la partie la moins réfrangible du rayonnement solaire, c'est-à-dire celle qui est formée par les rayons les plus lumineux, orangés, jaunes et verts, quoique tous les rayons la déterminent, tandis que celle qui infléchit les tiges végétales est surtout la partie la plus réfrangible, bien que ce phénomène physiologique soit également produit, mais à un faible degré, par l'extrémité la moins réfrangible du spectre.

On a dit précédemment que les parties vertes des végétaux étaient celles qui sous l'influence de la lumière donnaient lieu au dégagement de gaz oxygène. Il ne paraît pas que dans cette action les stomates qui existent à leur surface y jouent un rôle nécessaire. De Candolle (1) a fait observer que le gaz oxygène s'échappe des feuilles mises sous l'eau au soleil, aussi bien par celles de leurs surfaces qui n'ont point de stomates que par celles qui en ont; et, d'un autre côté, les fruits verts et charnus, qui n'ont point de stomates, dégagent du gaz oxygène comme ceux qui en ont. M. Duchartre (2), qui a fait de nombreuses expériences avec des plantes de diverses espèces, a montré également qu'il n'y a aucune relation fixe entre le nombre et la grandeur des stomates et

(1) *Physiologie végétale*, t. 1er, p. 143.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 37, et t. 63, p. 854.

les quantités de gaz dégagé au soleil; il pense qu'indépendamment des stomates on doit faire intervenir les cellules de l'épiderme des plantes dans l'accomplissement des phénomènes respiratoires.

L'on sait que le même côté d'une feuille est toujours tourné vers le ciel et, d'après ce motif, porte le nom de surface supérieure; suivant les observations de Bonnet citées antérieurement, page 239, si l'on dirige ce côté vers la terre la feuille ne tarde pas à se retourner. M. Boussingault (1) a étudié d'une manière comparative l'action produite à la lumière par les surfaces des feuilles sur un mélange d'air et d'acide carbonique. Il a caché avec du vernis ou du papier noirci un côté des feuilles et les a placées dans le mélange gazeux; en opérant simultanément sur deux feuilles introduites dans des éprouvettes différentes, puis en analysant les mélanges gazeux après l'action de la lumière, il a pu comparer l'action exercée sur chaque surface à celle qui s'exercerait si la feuille était libre de tout écran. Il a pu reconnaître que la surface supérieure avait toujours une action plus énergique que la surface inférieure; ainsi, dans une expérience, une feuille de laurier lui a donné le rapport de 4 à 1 pour exprimer les actions sur ces deux surfaces, et une feuille de peuplier blanc celui de 6 à 1. Mais ces effets sont variables avec l'épaisseur et la rigidité des feuilles, et la différence entre les effets produits sur les deux surfaces est moins prononcée quand les feuilles sont plus minces. MM. Cloëz et Gratiolet, dans les recherches mentionnées plus haut, ont reconnu également que dans les plantes qui végètent sous l'eau la partie supérieure des feuilles est le siége le plus actif des décompositions.

Sans entrer dans des détails physiologiques étendus, il est nécessaire d'indiquer quels sont les effets généraux observés quant aux proportions d'acide carbonique, d'oxygène et d'azote absorbées ou exhalées par les végétaux sous l'influence lumineuse.

*Acide carbonique.* — L'acide carbonique est absorbé et décomposé par les plantes (2) sous l'influence de la lumière, mais il semblerait résul-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 63, p. 706 et 748. *Ann. de chimie et de phys.*, 4e serie, t. 13, p. 868.

(2) M. Schultz (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 19, p. 524) avait avancé que l'oxygène émané des plantes ne provenait pas de la décomposition de l'acide carbonique, mais des acides végétaux, malique oxalique, etc., que les plantes pouvaient contenir; M. Boussingault (*Comptes rendus*, t. 19, p. 945) a montré qu'il n'en était rien, et que l'acide carbonique seul donnait lieu au dégagement d'oxygène des feuilles sous l'influence de la lumière.

ter des expériences de de Saussure que le mélange d'oxygène à ce gaz est nécessaire pour la respiration végétale. M. Boussingault (1) en plaçant des feuilles dans des atmosphères formées d'acide carbonique pur, ou mélangé d'air ou d'autre gaz, et en analysant les produits gazeux après un certain temps d'insolation, a trouvé que les feuilles exposées au soleil dans de l'acide carbonique pur, à la pression ordinaire de l'atmosphère, ne décomposent pas ce gaz, ou que du moins, si cela a lieu, c'est avec une extrême lenteur. Au contraire, elles le décomposent rapidement quand il est mélangé d'air; lorsqu'il contient de l'hydrogène ou de l'azote, sa décomposition paraît marcher aussi vite que dans ce dernier cas. Comme en diminuant la pression de l'acide carbonique pur, cette réaction est plus rapide que lorsque la pression est celle de l'air, M. Boussingault a émis l'opinion que les gaz mélangés à l'acide carbonique n'agissent qu'en diminuant la pression de ce dernier gaz et que le phénomène chimique de la respiration végétale conduit à un résultat analogue à celui que présente le phosphore, qui ne s'oxyde pas dans de l'oxygène pur à la pression ordinaire, mais qui se combine à ce dernier gaz quand celui-ci est mélangé d'un autre gaz ou que sa pression est moindre.

Si les parties vertes des végétaux absorbent et décomposent l'acide carbonique sous l'action de la lumière, elles émettent une certaine quantité de ce gaz à l'obscurité, et cela à peu près en proportion de l'oxygène absorbé; le résultat final est le même que celui qui serait produit par une sorte de combustion. Mais la quantité d'acide carbonique émise alors est bien moindre que celle qui est fixée par les plantes. Ainsi, d'après les expériences faites par M. Boussingault (2) du mois de juin au mois d'août 1865, entre huit heures du matin et cinq heures du soir, dans des atmosphères riches en acide carbonique, 1 mètre carré de feuilles de laurier a donné en moyenne par jour :

| | | Litre. |
|---|---|---|
| à la lumière, | acide carbonique absorbé..... | 1,108 |
| à l'obscurité, | id. dégagé..... | 0,070 |

le rapport des deux quantités est à peu près celui de 16 à 1, c'est-à-dire qu'avec ces feuilles la décomposition de l'acide carbonique à la lumière a été seize fois plus vive en moyenne que l'émission de ce gaz à l'obscurité.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 60, p. 872.
(2) *Ibid.*, t. 61, p. 606.

M. Corenwinder (1) a étudié cette émission d'acide carbonique par les plantes, et a reconnu qu'un certain nombre de végétaux donnent de l'acide carbonique non-seulement pendant la nuit, mais encore à l'ombre, c'est-à-dire à la lumière diffuse. Dans leur jeunesse, presque tous exhalent ainsi une petite quantité d'acide carbonique à la lumière diffuse; le plus souvent dans l'âge adulte cette émission cesse; cependant, d'après cet observateur, quelques-uns présenteraient cet effet dans toutes les phases de leur existence. La quantité d'acide carbonique décomposée le jour est tellement plus grande que celle qu'une même plante exhale la nuit, qu'il suffit souvent de trente minutes d'insolation pour faire regagner à celle-ci ce qu'elle a perdu pendant la nuit. Cette valeur est à peu près semblable à celle qui résulte de la détermination précédente.

*Oxygène.* — On a dit antérieurement que l'émission de gaz oxygène à la lumière avait été reconnue par Priestley et vérifié par tous les physiologistes qui se sont occupés de la respiration des plantes. De Saussure a prouvé qu'il y avait fixation d'oxygène en même temps que de carbone dans un végétal, car le volume de ce gaz émis était inférieur au volume d'acide carbonique absorbé.

D'après M. Boussingault (2), cette conclusion doit se rapporter à l'ensemble du végétal et non aux feuilles ou aux parties vertes, car les parties non colorées absorbent de l'oxygène et forment de l'acide carbonique, dont une portion peut être est émise pendant la nuit; il a pensé qu'en analysant une certaine quantité de feuilles avant l'insolation, puis une même quantité après, c'est-à-dire en dosant tous les éléments de la plante, ainsi que ceux de l'atmosphère avant et après l'insolation, on pourrait connaître quelle proportion de chaque substance serait fixée dans le végétal ou éliminée.

Il a trouvé ainsi que sous l'action de la lumière il y avait sensiblement autant d'oxygène émis que d'acide carbonique éliminé. Ainsi dans quarante-et-une expériences, quinze ont donné de l'oxygène en excès, neuf égalité des deux gaz, et dix-sept expériences excès d'acide carbonique. La somme totale pour toutes les expériences a été de 1339 centimètres cubes d'acide carbonique décomposé et 1322 cent. cubes d'oxygène émis; il y a eu un résidu de 16 cent. cubes probablement d'azote. Ce résultat peut s'énoncer ainsi :

(1) *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 54, p. 321.
(2) *Ibid.*, t. 66, p. 295.

Pour 100 d'acide carbonique décomposé il y a eu 98,75 d'oxygène émis et 1,25 de résidu.

*Azote.* — On a vu au commencement de ce paragraphe que les feuilles insolées sous l'eau donnent lieu à un dégagement d'azote; cet élément est-il fixé dans les plantes pendant l'action lumineuse? D'où vient l'émission d'azote que l'on observe quand les feuilles dégagent de l'oxygène sous l'eau? Telles sont les questions auxquelles les recherches des expérimentateurs déjà cités permettent de répondre.

Quant à l'émission d'azote, elle résulte des expériences faites depuis de Saussure par les différents observateurs qui ont étudié le dégagement de gaz des plantes insolées sous l'eau. M. Draper l'a observé dans le mémoire cité plus haut lors de l'action des rayons de diverse réfrangibilité sur un certain nombre de plantes. MM. Cloëz et Gratiolet en étudiant le dégagement d'oxygène avec les plantes aquatiques insolées et en se servant d'eau bouillie et privée d'azote ont vu la quantité de ce gaz diminuer à mesure que l'on prolongeait le temps de l'insolation et l'oxygène devenir de plus en plus pur; d'un autre côté, l'analyse d'une même quantité de plantes non insolées a donné une proportion plus grande d'azote, de sorte que l'émission de ce gaz par les feuilles sous l'eau est dû non-seulement à l'azote que l'eau peut contenir, mais encore à une altération des plantes.

Les recherches faites par M. Boussingault (1) en analysant complétement des quantités équivalentes de feuilles avant et après l'insolation, ainsi que l'atmosphère dans laquelle elles se trouvaient, sont venues démontrer que dans l'action de la lumière sur les feuilles il n'y a ni absorption ni émission d'azote, car il y a presque autant d'oxygène éliminé que d'acide carbonique absorbé, et la faible différence d'azote (1,25 pour 100) peut provenir de l'air interposé dans les feuilles. Il résulte de là que dans l'action lumineuse l'azote de l'air ne se fixe pas dans les feuilles, et que celui qui se trouve assimilé aux végétaux provient des composés ammoniacaux ou des matières transportées dans le végétal pendant la circulation de la séve (2). Quant à l'émission qui a lieu lors de l'insolation des feuilles sous l'eau, elle provient sans

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 66, p. 295.

(2) La question de l'assimilation directe de l'azote de l'atmosphère par les plantes a été le sujet de longues discussions ; mais, d'après ce qui vient d'être dit, il ne paraît pas qu'elle puisse avoir lieu, et l'on doit attribuer aux nitrates et aux composés azotés pouvant exister dans l'air ou dans le sol l'azote qui s'y trouve fixé.

doute d'une altération du végétal et de l'air interposé dans le liquide ambiant.

Dans l'acte de végétation il se manifeste un grand nombre de réactions, et des produits divers prennent naissance à certains moments de la vie végétale ; l'absence ou la présence de la lumière dans certains cas peut alors intervenir. On a vu qu'en l'absence de la lumière, au lieu de fixer du carbone, la plante agit comme les animaux lors de leur respiration, brûle les matières carbonacées et émet de l'acide carbonique ; aussi trouve-t-on dans les végétaux étiolés une matière azotée cristallisée, l'asparagine (1), dont M. Boussingault rapproche la production de celle de l'urée dans les animaux, assimilant ainsi l'une à l'autre les fonctions respiratoires des animaux et des végétaux privés de lumière. Cette substance, du reste, peut se présenter même dans les plantes exposées à la lumière, mais pendant les premières phases de leur existence alors qu'elles se comportent comme agents d'oxydation ; ensuite, quand la végétation est plus avancée, la fixation du carbone a lieu sous l'influence de la lumière, et cette matière disparaît dans les plantes, celles-ci fonctionnant alors comme agent de réduction.

### § 6. *Coloration des fleurs et des tissus végétaux.*

La lumière donne lieu à d'autres effets de coloration dans les plantes qu'à la formation de la matière verte, et certaines parties du tissu végétal, particulièrement des fleurs et des fruits, ne doivent leur couleur qu'à son action. On pourrait dire que toutes les couleurs végétales sont produites par elle si l'on voulait entendre que sans son influence une plante ne pourrait parcourir toutes les phases de son existence ; mais dans ce cas ce ne serait pas en vertu d'une action directe exercée par les rayons lumineux que l'effet aurait lieu, mais en raison d'effets secondaires, c'est-à-dire de réactions qui se passent dans les tissus végétaux pendant l'acte de la végétation ; ainsi beaucoup de fleurs sont colorées au moment où elles s'épanouissent. Il se produit donc des composés qui peuvent être acides ou alcalins et dont les actions sur les matières contenues dans les tissus végétaux donnent lieu aux effets que l'on observe.

Il existe des plantes incolores qui paraissent parcourir les différentes phases de leur existence sans se colorer ; les champignons sont dans ce

(1) Menici et Piria, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 19, p. 575 et 919 (1844). — Boussingault, *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 13, p. 238 (1868).

cas. Dans les mines les plus obscures, certains de ces champignons peuvent se développer, ce qui est une conséquence de l'absence de coloration qui leur permet de se passer de l'influence de la lumière. Il faut remarquer toutefois qu'ils végètent aux dépens de la matière organique toute formée.

Ce ne sont pas seulement les fleurs qui présentent des colorations diverses, mais encore les feuilles de certaines plantes, principalement celles qui naissent dans le voisinage des fleurs.

Un certain nombre de fleurs qui naissent blanches se colorent ensuite par l'action de la lumière, preuve d'une action directe pour amener cette coloration. On peut citer à ce sujet les exemples suivants :

Le *cheiranthus chamœleo* a une fleur d'abord blanchâtre, puis jaune citron, puis rouge violacé. Le *stylidium fruticosum* a des pétales d'un jaune pâle à leur naissance, et ensuite blancs légèrement rosâtres. L'*œnothera tetraptera* a des fleurs d'abord blanches, puis roses, puis presque rouges. Le *tamarindus indica* a les pétales blancs le premier jour et jaunes le second. Le *cobæa scandens* a une couleur verdâtre le premier jour et violette ensuite. L'*hibiscus mutabilis* a une fleur qui naît le matin avec une couleur blanche, et qui devient rouge ou incarnat au milieu du jour et rouge le soir (1).

Les boutons floraux de l'*agapanthus umbellatus* sont encore blancs lorsqu'ils commencent à s'ouvrir ; ils prennent ensuite une teinte bleue. Si on enveloppe la fleur avant sa sortie de la spathe, ou au moment où elle s'ouvre, d'un papier noir qui intercepte la lumière, cette fleur reste blanche ; remise à la lumière, elle se colore ensuite graduellement tout en conservant une teinte plus pâle que celles qui se sont ouvertes au jour (2).

J'ai observé que si on laisse fleurir un pied de *crassula* à fleurs rouges dans une chambre peu éclairée, les pétales prennent seulement une teinte rosée passant au jaune à leur base ; le tube de chaque fleur est aussi jaune. Un séjour de plusieurs heures aux rayons directs du soleil donne lieu à une coloration rouge de toutes les corolles de ces petites fleurs. Si quelques parties de la plante sont garanties par une enveloppe en papier noirci, alors les fleurs cachées de cette manière conservent la teinte pâle qu'elles avaient à la lumière diffuse de la chambre. Ainsi pour quelques plantes la lumière diffuse suffit pour donner

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 911.
(2) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 52, p. 383 (1844).

leur coloration; pour d'autres, la lumière solaire directe ou une très-forte lumière diffuse est nécessaire.

Il est intéressant de signaler ici le fait que présente le lilas coloré (*syringa vulgaris*, principalement la variété nommée lilas de Marly) quand on le fait fleurir en culture forcée dans une serre chaude; au lieu d'être violet plus ou moins rouge, il est alors complétement blanc. Pour obtenir ces fleurs incolores, les jardiniers prennent dans un moment quelconque de l'hiver des pieds enracinés de lilas, et les plantant sous une bâche, ils obtiennent la floraison des panicules blanches dans l'espace de quinze ou vingt jours; une température constante de 15° environ suffit pour obtenir ce résultat; quand la température constante de la serre où se trouve les pieds de lilas est de 32 à 35°, on peut même obtenir la floraison en quatorze jours. Le temps nécessaire pour que les boutons floraux soient ouverts dépend, bien entendu, de la température du milieu ambiant; mais qu'elle soit plus ou moins élevée et que la serre soit éclairée ou privée de lumière, bien que les boutons floraux présentent une légère trace de coloration, quand les fleurs sont ouvertes elles sont tout à fait incolores. Tel est le moyen dont on se sert pour avoir pendant tout l'hiver des bouquets de lilas blancs.

M. Duchartre (1) a placé un pied de lilas dans l'intérieur d'une serre, mais de façon à ce que les branches se trouvent en partie dans l'atmosphère de la serre, contre les vitres, et soient bien éclairées, et que les autres branches, passant au travers d'une ouverture faite à une vitre, restent libres à l'air extérieur. La température moyenne étant de 15°, il a vu que le développement des branches dans la serre a été plus rapide que celui des branches placées à l'air libre, et que ces branches ont donné des panicules blanches au bout de dix-huit jours environ; deux semaines après, les branches de l'extérieur ont donné des fleurs colorées comme à l'état normal.

Ainsi dans une serre maintenue à 15° le principe colorant ne se développe pas dans le tissu des corolles du lilas, bien que les fleurs reçoivent une lumière assez vive. D'où peut provenir cette décoloration?

On ne peut dire que la privation seule de lumière soit la cause de la décoloration des fleurs du lilas; il pourrait se faire qu'elle dépendît d'une rapidité trop grande de végétation d'après laquelle la matière colorante

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 56, p. 939 (1863).

ne pourrait se produire, ou d'une trop faible somme de lumière reçue par la plante forcée, ou bien peut-être de ces deux causes réunies ; à moins de supposer, comme l'a fait M. Duchartre, que l'atmosphère de la serre soit douée d'un pouvoir d'oxydation plus énergique que l'air extérieur pouvant amener la destruction de la matière colorante, ce qui n'est pas démontré ; il faudrait, pour s'en assurer, varier les circonstances de l'expérience et suivre la floraison dans la serre quand, la température étant plus basse, on se trouverait dans des conditions calorifiques analogues aux conditions extérieures. On voit qu'il serait intéressant d'étudier de nouveau ce phénomène et d'examiner quelle pourrait être l'influence des différents rayons lumineux sur les fleurs ainsi décolorées et encore attenant à leur tige, pour amener leur coloration naturelle.

L'enveloppe des fruits donne lieu comme les fleurs à des effets de coloration sous l'influence de la lumière. On sait en effet que les couleurs rouges des pêches ne sont dues qu'à l'action de la lumière, ainsi que ces tons jaunes et rouges des pommes, du raisin et d'un grand nombre de fruits. Mais, bien qu'on ait reconnu ces effets généraux de coloration, on n'a pas recherché quelles étaient les parties du rayonnement lumineux qui exerçaient une action, et si la même partie de l'image prismatique qui concourt à la formation de la matière verte produisait dans les plantes les colorations dont il est ici question ; ce serait une étude qui présenterait un grand intérêt.

Si pendant la vie végétale la lumière, par son action, donne lieu aux différentes substances renfermées dans les végétaux et principalement aux différentes couleurs des feuilles et des fleurs, après la mort ces matières soumises à l'action de l'oxygène sous l'influence des rayons lumineux se décolorent peu à peu, comme les matières colorantes dont il a été question, livre II, page 47 ; elles subissent la loi commune des matières organiques, et sont brûlées par l'action des rayons lumineux. Quelquefois même, quand la lumière est trop vive, celle-ci agit sur les couleurs des végétaux pendant la végétation pour les détruire : ainsi quand on cultive les tulipes on les garantit du soleil, sans quoi leurs couleurs pâlissent.

### § 7. *Intensité de l'action chimique produite par les rayons solaires sur les plantes. Résumé du chapitre Ier.*

On voit en résumé que la lumière est indispensable à la vie végétale, et que si certaines plantes peuvent végéter pendant quelque temps

dans l'obscurité, elles sont languissantes et étiolées, et ne sauraient parcourir les différentes phases de leur existence.

Les éléments les plus essentiels qui constituent les plantes sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, auxquels on peut joindre l'azote, si l'on fait abstraction des substances telles que le silicium, le phosphore, le soufre ainsi que des bases, comme la potasse, la soude, la chaux, etc., qui ne s'y trouvent qu'en plus faibles proportions. Ces quatre substances se rencontrent dans l'atmosphère, et si les trois dernières sont fixées dans les plantes lors du mouvement de la séve, par des réactions chimiques non encore connues, dont nous n'observons que le résultat final, le carbone est fourni par l'acide carbonique, et c'est la lumière qui détermine l'action en vertu de laquelle il s'accumule dans les végétaux.

Il est très-remarquable de voir que c'est par suite de la présence d'une très-petite quantité d'acide carbonique dans l'atmosphère et dans le sol végétal, que cette assimilation du carbone a lieu à la surface de la terre. Si l'on s'en tient à l'atmosphère seule, on estime en moyenne à $\frac{4}{10000}$ du volume de l'air, le volume du gaz acide carbonique qui existe à un moment donné dans l'enveloppe gazeuse de la terre. En supposant que l'acide carbonique soit répandu partout en même proportion, comme le poids de l'atmosphère équivaut au poids d'une couche d'eau de $10^m,33$ répandue sur la surface de la terre, le poids du carbone contenu dans l'acide carbonique existant dans l'air équivaut à celui d'une couche de houille, supposée en carbone pur, qui aurait 1 millim. $\frac{1}{4}$ d'épaisseur et qui envelopperait partout la terre. Cette quantité est très-minime, et cependant c'est elle qui fournit le carbone qui se fixe à chaque instant dans les végétaux. On doit ajouter que la perte de l'acide carbonique est compensée à chaque instant par les quantités du même gaz que le sol peut émettre lors de la décomposition des matières organiques, ainsi que par l'acide carbonique qui provient de la respiration des animaux.

On peut avoir une idée de la quantité de travail déterminée par l'action de la lumière solaire sur la végétation et dont on pourrait retrouver l'équivalent lors de la combustion des végétaux, en évaluant la quantité de carbone fixée pendant un temps donné par les végétaux, car le carbone provient, comme on l'a vu, de la décomposition de l'acide carbonique. Il serait nécessaire de tenir compte des autres éléments dont se composent les plantes; mais comme l'oxygène et l'hydrogène sont en des proportions peu différentes de celles qui sont nécessaires

pour former de l'eau, et que les autres matières entrent pour une moindre quantité, l'erreur que l'on commet en s'en tenant au carbone ne peut changer beaucoup les indications générales que l'on va donner, et qui ne sont d'ailleurs que très-approximatives.

Dans nos climats tempérés, 1 hectare de forêt produit à peu près annuellement 1800 kilogr. de carbone; M. Chevandier (1) a trouvé en effet en analysant les différents produits de deux forêts, lors de coupes successives, la quantité de chaque espèce de marchandise qu'on en a tirée, charpente, bois à brûler, fagots, etc., étant connue :

| | Carbone. | Hydrogène. | Oxygène. | Azote. | Cendres. |
|---|---|---|---|---|---|
| | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| Pour une forêt de 69 ans. | 1754 | 213 | 1507 | 33 | 48 |
| Pour une forêt de 58 ans. | 1854 | 225 | 1586 | 36 | 53 |

C'est-à-dire à peu près annuellement 1800 kilogrammes de carbone fixés par hectare.

Cette quantité de carbone représente une couche de houille qui recouvrirait le sol et qui aurait environ $\frac{13}{100}$ de millimètre d'épaisseur; comme on vient de voir que l'acide carbonique qui se trouve dans l'air donnerait à un moment donné une couche de houille dix fois plus épaisse si tout le carbone qu'il contient venait à être fixé sur le sol, il en résulte que si toute la surface du globe était couverte d'une végétation égale à celle des deux forêts ci-dessus, et que l'acide carbonique absorbé ne se renouvelât pas, au bout de dix ans environ l'air en serait entièrement dépouillé.

Dans ces forêts la végétation commence vers la fin d'avril, pour s'arrêter à la fin de septembre quand les feuilles commencent à jaunir; on ne peut compter ainsi que sur cinq mois de végétation; cela donne 360 kilogr. de carbone fixés par mois de végétation active sur chaque hectare. Si l'on suppose donc que la végétation soit la même pendant toute l'année, la quantité de carbone fixée par les arbres par hectare serait de 4320 kilogrammes.

Le nombre indiqué ci-dessus est relatif à notre pays; mais dans les régions équatoriales, où la végétation est plus active, il serait certainement supérieur. Si l'on considère les autres espèces de culture dans nos climats, la proportion de carbone fixée annuellement peut être plus

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. 10, p. 129 (1844).

grande : ainsi M. Chevandier a reconnu que pendant une année dans une prairie bien fumée il se formait par hectare 3500 kilogr. de carbone fixés dans les plantes; M. Boussingault a obtenu par la culture des topinambours, qui donne le chiffre le plus élevé, la quantité de 6310 kilogr. On peut donc considérer comme variant de 1500 à 6000 kilogr. la proportion de carbone fixée annuellement par hectare des diverses cultures dans les régions tempérées, et cela par l'action de la lumière sur les différents végétaux.

D'après cela, si l'on cherche combien cette quantité de carbone en brûlant donne de chaleur, on peut avoir une idée de la quantité du travail produit par la lumière sur les végétaux à la surface de la terre : comme 1 kilog. de carbone fournit 8000 unités de chaleur, c'est-à-dire la quantité de chaleur qui élèverait 8000 kilogr. d'eau de 0 à 1°, les nombres ci-dessus donnent ces quantités de chaleur comme variant de 12000000 à 48000000. D'après le nombre cité dans le premier livre de ce volume, page 43, les rayons solaires en un an donnent à chaque centimètre carré de la surface de la terre 231675 unités de chaleur, dont une moitié environ est arrêtée par l'atmosphère, de sorte qu'il n'arrive vers nous que 115837 unités, c'est-à-dire 115837 fois la quantité de chaleur qui élèverait 1 gramme d'eau de 0 à 1°; or 1 hectare renfermant 100000000 centimètres carrés, le nombre d'unités de chaleur correspondant à l'action des rayons solaires étant transformé en kilogrammes serait,

$$100000000 \times 115^{\text{kil.}},827 = 11583700000.$$

Par conséquent la quantité de travail effectuée annuellement par hectare lors de la décomposition de l'acide carbonique sur les feuilles sous l'influence solaire serait donc dans nos climats, par rapport à la quantité de travail fournie lors de l'échauffement des rayons solaires, compris entre les valeurs minima et maxima :

$$\frac{12}{11583} \quad \text{et} \quad \frac{48}{11583}$$

c'est-à-dire entre 1 et 4 millièmes de l'action due à l'échauffement solaire.

On a négligé l'action exercée par les substances autres que le carbone qui se trouvent dans les végétaux, et l'on sait qu'il y a fixation d'hydrogène et d'azote; mais si l'on tenait compte de la quantité de travail qu'elles représentent on n'arriverait pas à augmenter de moitié les nombres qui

viennent d'être indiqués. On peut donc dire, en somme, que la quantité de travail fournie par les rayons solaires pendant l'acte de la végétation à la surface de la terre dans nos climats, et qui se trouve emmagasinée dans les plantes pour être utilisée ensuite lors de la combustion ou de l'emploi de ces matières, n'atteint pas un centième de l'action calorifique produite par l'influence de ces mêmes rayons.

On vient de voir que pendant toute l'année, mois de végétation ou de non-végétation compris, un hectare de forêt dans nos climats fixe par mois 150 kilogr. de carbone, c'est-à-dire par jour de vingt-quatre heures, la nuit comprise, 5 kilogram. On sait, d'un autre côté, qu'un homme de trente à quarante ans dans l'acte de la respiration fournit une quantité d'acide carbonique qui équivaut à celle donnée par la combustion de 11 grammes de carbone par heure; une femme du même âge donne 7 gr. de ce gaz : on peut donc admettre en moyenne 9 gr. par personne. Il résulte de là qu'en vingt-quatre heures une personne fournit la quantité d'acide carbonique équivalant à 216 grammes, et que vingt-trois personnes produisent dans le même temps, par l'acte de la respiration, la quantité de carbone qui est fixée en moyenne pendant l'année par la végétation d'un hectare de forêt. Les autres cultures donneraient des résultats différents, car les prairies dans nos climats donnent une fixation de carbone égale à celle que produisent dans le même espace de temps quarante-six personnes, et les cultures plus abondantes un nombre encore plus grand.

Cette différence dans les phénomènes chimiques de la vie animale et de la vie végétale montrent donc deux genres de réactions dont le résultat final est opposé, puisque les animaux sont des agents d'oxydation et les végétaux des agents de réduction ; les premiers en effet dans leur respiration consomment de l'oxygène, produisent de l'acide carbonique et dégagent de la chaleur, tandis que les végétaux fixent du carbone, de l'hydrogène et de l'azote, émettent de l'oxygène et exigent pour cela l'influence d'une force physique extérieure, la lumiere, dont l'action équivaut à une certaine quantité de chaleur, force qui est pour ainsi dire emmagasinée dans les plantes. L'oxygène consommé par les animaux est donc restitué par les plantes sous l'influence de la lumière, et l'acide carbonique fourni par les animaux est décomposé par elles; l'équilibre se trouve ainsi maintenu dans l'atmosphère à l'époque actuelle (1).

(1) Il est possible que dans les âges antérieurs l'acide carbonique ait été en plus grande

# CHAPITRE II.

## Effets produits sur les animaux.

---

### § 1. *Action exercée sur les infusoires.*

La lumière solaire, dans certaines circonstances, peut exercer une influence sur les animaux; mais on ne peut plus dire, comme pour les végétaux (1), qu'elle est indispensable aux différentes phases de leur existence; elle n'intervient chez eux d'une manière nécessaire que dans les phénomènes de la vision pour leur faire connaître les couleurs, les formes et les distances des objets extérieurs.

Si l'on considère des animaux placés à des degrés différents dans l'échelle des êtres organisés et qu'il ne soit pas question des phénomènes de la vision, dont on s'occupera dans le livre suivant, on peut trouver des effets plus ou moins marqués : chez les infusoires l'action lumineuse est puissante, et l'on va voir que ces êtres sont aussi impressionnables que les végétaux à l'influence lumineuse; chez d'autres animaux, comme les batraciens, cette action est moins sensible, et quand on arrive aux mammifères, il n'est pas démontré que la lumière intervienne dans les diverses conditions de leur vie et qu'elle agisse autrement que pour provoquer la coloration de la peau ou du pelage.

Il se développe dans les eaux stagnantes, sous l'influence de la lumière, un grand nombre d'êtres organisés microscopiques, comme la matière verte qui a été observée par Priestley et étudiée par Senebier et d'autres physiologistes. Ces êtres organisés appartiennent les uns au règne végétal, les autres au règne animal, et M. Aug. Morren (2) a découvert que ces animaux comme ces végétaux ont la faculté d'aug-

proportion, comme on serait tenté de le croire d'après l'abondance des roches calcaires qui existent dans les diverses formations géologiques. (Voir Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité de physique terrestre et de météorologie.*)

(1) A l'exception peut-être de quelques criptogames, comme on l'a vu antérieurement.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 1, p. 456, et t. 12, p. 5. — A. Morren et Ch. Morren., *Recherches sur l'influence qu'exercent la lumière, les animacules, etc., sur la qualité et la quantité des gaz que les eau peuvent contenir;* Bruxelles, 1841.

menter à certains moments la proportion d'oxygène contenue dans les eaux qui les baigne ; il a reconnu que c'était par les jours les plus beaux et les plus chauds de l'année que l'oxygène est le plus abondant. Habituellement la quantité d'oxygène contenue dans l'eau est de 30 à 32 pour 100 du gaz renfermé ; en présence des animalcules, cette quantité peut s'élever à près du double, c'est-à-dire à 61 pour 100.

MM. A. Morren et Ch. Morren ont fait sur ce sujet plusieurs séries de recherches, d'après lesquelles il résulte que l'oxygène et l'acide carbonique que les eaux renferment sont en raison inverse l'un de l'autre, ce qui semble montrer que l'eau s'oxygène aux dépens de l'acide carbonique qui est décomposé par les infusoires de couleur verte (monades et volvox). L'oxygénation varie très-sensiblement dans l'espace de vingt-quatre heures : elle est à son minimum au lever du soleil, et atteint son maximum de quatre à cinq heures du soir ; un temps couvert, froid et pluvieux fait disparaître la succession régulière de ces phénomènes. Si les animalcules disparaissent, le maximum d'oxygénation disparaît avec eux. L'oxygène qui provient de ces divers effets est versé dans l'atmosphère pendant le jour comme pendant la nuit, le soir avec une énergie croissante, et la nuit en moindre proportion.

On peut conclure de là que les animalcules verts, comme la partie verte des plantes, dégagent de l'oxygène sous l'influence de la lumière solaire et diffuse en décomposant l'acide carbonique, et en son absence émettent une certaine quantité de ce gaz. Indépendamment des animalcules verts, il y a d'autres animalcules, de couleur rouge, qui produisent les mêmes effets. Quant aux rayons actifs, ils sont compris dans la partie la moins réfrangible de l'image prismatique, tandis que les rayons bleus et violets paraissent sans influence.

Voilà donc un exemple remarquable de l'action exercée par la lumière sur les infusoires, dont les tissus agissent sur l'acide carbonique à la manière des tissus végétaux. Il faut même remarquer que lorsque l'eau dans un espace limité contient des poissons, ceux-ci absorbent rapidement l'oxygène tenu en dissolution, et les infusoires peuvent lui restituer cet oxygène par la décomposition de l'acide carbonique sous l'action des rayons solaires.

§ 2. *Influence de la lumière sur certaines fonctions des animaux.*

M. Moleschott (1) a étudié la respiration des grenouilles sous l'influence d'une lumière plus ou moins vive en mesurant la quantité d'acide carbonique exhalée, les unes renfermées dans des vases soustraits à l'action de la lumière, les autres sous l'influence de cet agent. D'après la moyenne des nombres obtenus dans un grand nombre d'expériences, il a trouvé que le poids de l'acide carbonique produit dans l'obscurité est au poids du même gaz exhalé à la lumière dans le rapport de 100 : 125.

Il a voulu examiner ensuite si cette influence est exercée par l'intermédiaire des yeux ou par celui de la peau, ou bien enfin par tous les deux à la fois. Des grenouilles ont été privées de la vue à l'aide d'une cautérisation à l'azotate d'argent, et elles ont été comparées à des animaux intacts; les nombres obtenus ont donné le rapport moyen de 100 : 114 comme exprimant la proportion d'acide carbonique produite par les grenouilles aveuglées par rapport à celui produit par les grenouilles intactes.

Voici quelles sont les conclusions générales de ses recherches :

1° Les grenouilles, pour les mêmes unités de poids et de temps, exhalent de $\frac{1}{12}$ et jusqu'à $\frac{1}{4}$ d'acide carbonique en plus lorsqu'elles respirent sous l'influence de la lumière que dans l'obscurité, la température étant la même ou différant peu.

2° La production de l'acide carbonique s'accroît en raison directe avec l'intensité de la lumière à laquelle ces animaux sont exposés.

3° L'influence que la lumière exerce, en augmentant la quantité d'acide carbonique, est transmise en partie par les yeux, en partie par la peau.

M. J. Béclard (2) a soumis différents animaux à l'influence de la lumière sous des cloches colorées ; il a observé que des oiseaux ou des petits mammifères dont la peau est couverte de plumes ou de poils et que la lumière ne frappe pas à sa surface, ne présentent pas dans un temps donné, par la respiration, une quantité d'acide carbonique qui soit notablement différente.

Il n'en est pas de même des grenouilles, dont la peau est nue et dont

(1) *Ann. des sciences naturelles*, 4e série, zoologie, t. 4, p. 209 (1855).
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 46, p. 441 (1858).

la respiration cutanée est énergique; sous l'influence des rayons verts un même poids de grenouilles a produit dans un même temps une quantité d'acide carbonique plus considérable que dans les rayons rouges. Dans cette circonstance la peau de l'animal paraît avoir une influence sur les résultats observés, car les rapports sont inverses quand les grenouilles en sont privées.

Plusieurs expériences tentées sur l'exhalaison cutanée de la vapeur d'eau ont indiqué que dans l'obscurité les grenouilles ont perdu par évaporation une quantité d'eau moitié moindre qu'à la lumière diffuse ordinaire; et qu'à la lumière violette l'effet a été le même que dans ce dernier cas.

Dans la même série de recherches, M. Béclard a observé que des œufs de mouche (*musca carnaria*) placés en même temps sous des cloches de verre coloré ont donné naissance à des vers; mais si au bout de plusieurs jours on compare entre eux les vers éclos sous ces cloches, on remarque que leur développement est très-différent : les vers les plus développés correspondent à la lumière violette ou bleue, et les vers qui se trouvent sous les cloches rouges, jaunes, blanches ou vertes sont moins développés.

Il n'est pas prouvé, d'après ces diverses expériences, que la lumière intervienne directement dans le jeu des organes, en admettant même que les conditions extérieures autres que celles qui proviennent d'une différence d'illumination soient les mêmes; il serait possible que la lumière produisît simplement une excitation sur la peau d'où résulterait peut-être une agitation des animaux, et comme effet secondaire une augmentation dans les phénomènes respiratoires.

Du reste les fibres nerveuses et musculaires peuvent être excitées directement par la lumière, et M. Brown-Sequard (1) a montré que l'iris des yeux des batraciens et des poissons pouvait se contracter sous l'influence des rayons lumineux, soit sur l'œil intact, soit sur l'œil enlevé de l'orbite. Des différents rayons lumineux, ce sont les rayons les plus éclairants qui paraissent agir le plus vivement.

D'après M. Brown-Sequard, si l'iris peut être excité directement par la lumière chez certains animaux et non pas chez d'autres, ce fait paraît tenir à une épaisseur de la membrane, et il pense que la disposition des tissus en couches très-minces est une condition essentielle pour

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 25, p. 483.

que les rayons lumineux puissent exercer leur action. Il serait donc possible que d'autres tissus que ceux de l'iris fussent excités par l'action de la lumière, quoiqu'à des degrés différents.

Peu de recherches ont été faites dans le but d'examiner si la lumière pouvait exercer une influence sur d'autres fonctions des animaux que les fonctions respiratoires et particulièrement sur leur développement. W. Edwards (1) a fait quelques expériences sur les batraciens; il a placé des œufs de grenouille dans l'eau dans deux vases dont l'un ne recevait pas la lumière et l'autre était transparent; les œufs exposés à la lumière se développèrent successivement, tandis qu'à l'obscurité aucun œuf ne vint à bien; sur quelques-uns cependant il y avait des marques de développement de l'embryon.

Des têtards placés au fond de la Seine et privés de lumière se développèrent plus tard que ceux qui étaient restés exposés à la lumière et qui avaient la faculté de venir à la surface de l'eau; mais dans ce cas les effets de la respiration n'ont peut-être pas été les mêmes et les différences observées ne tiennent peut-être pas seules au défaut d'illumination du milieu. Il plaça également des têtards de crapaud les uns dans des vases non transparents, les autres dans des vases éclairés : tous les têtards exposés à la lumière subirent leur métamorphose, et parmi ceux qui étaient restés dans l'obscurité un seul se développa; l'autre persista dans sa forme première et caractéristique du jeune âge; il acquit même de grandes dimensions. Edwards avait observé le même effet chez les têtards éclos à l'obscurité.

Quelques expériences faites depuis n'ont pas confirmé ces résultats : on a vu plus haut qu'avec les œufs de mouche M. Béclard avait observé un développement plus facile à la lumière, mais qu'il avait eu lieu également à l'obscurité; M. Higginbottom (2) a observé que les têtards de batracien peuvent se développer à l'obscurité comme à la lumière, et qu'il n'y a aucune différence quand les conditions de température sont les mêmes.

On ne peut dire, d'après cela, que l'action de la lumière chez les batraciens contribue au développement des différentes parties du corps et que son absence tende à faire prédominer la première forme, car la transformation de ces animaux est encore fort obscure, et on ne connaît

(1) *De l'influence des agents physiques sur la vie*, Paris, 1824, ch. 15, p. 394.

(2) *On the influence of physical agents*, etc., *Philosoph. transact.*, t. 140, p. 135 (1850).

pas les conditions nécessaires pour les accélérer ou les arrêter. Il en est de même ici que pour les axolotls, qui, d'après les observations faites par M. A. Duméril au Muséum d'histoire naturelle (1), dans les mêmes vases et dans des conditions en apparence semblables, peuvent perdre leurs branchies et se transformer, ou bien subsister sous leur forme première. On ne sait pas non plus, comme on l'a supposé, si le protée anguiforme, qui vit dans les eaux souterraines de la Carniole, tient sa forme de l'absence de la lumière, et s'il représente le premier état d'un animal qui étant adulte et dans des conditions normales serait autrement constitué.

On ne peut invoquer le dépérissement des personnes qui vivent dans un lieu obscur comme une preuve de l'étiolement dû à l'absence du rayonnement lumineux ; car des causes délétères diverses peuvent agir aussi bien que la privation de lumière. Cependant on doit observer que les yeux d'un certain nombre d'animaux qui vivent dans l'obscurité ne sont pour ainsi dire qu'à l'état embryonaire, et dès lors il ne se produit plus chez eux aucune excitation nerveuse de la part de l'agent lumineux; il pourrait donc se faire que l'absence de l'excitation produite sur les nerfs optiques pût influer sur les effets généraux des organes, et dans ce cas ce serait par une action secondaire, en se propageant de l'organe de la vision dans toute l'économie, que l'on pourrait dire que la lumière est favorable aux animaux; les expériences de M. Moleschott dont il a été question plus haut viennent à l'appui de cette supposition.

On a cité les habitants des régions équinoxiales, Chaymas, Caraïbes, Mexicains, Péruviens, etc., qui, d'après M. de Humboldt (2), ont le corps très-bien développé et bien conformé, comme offrant l'exemple de l'influence de la lumière sur la conformation et sur la santé; mais ce résultat pourrait tenir à d'autres causes économiques, et il faudrait savoir, par exemple, si chez ces peuples des mariages ont lieu entre des individus de mauvaise conformation comme dans nos populations.

### § 3. *Coloration des tissus des animaux. Insolation.*

La coloration brune de la peau que l'on observe sur les personnes exposées au soleil est due à l'action propre de la lumière, et c'est, en

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 60, p. 765, et t. 61, p. 775. — *Bulletin de la Société d'acclimatation*, 2e série, t. 1, 2, 3 et 4.

(2) *Voyage aux régions équinoxiales*, Paris, 1814, p. 471.

dehors des phénomènes de la vision, l'effet le plus immédiatement appréciable que cet agent puisse produire sur les animaux. Des observations semblables ont été faites sur la peau du nègre, qui devient également plus foncée sous l'influence solaire. Ce phénomène ne provient pas de l'action de la chaleur, mais est dû à une action propre de la lumière, analogue à celles qui ont été étudiées antérieurement; en effet, dans nos usines, les ouvriers qui sont exposés à une forte chaleur conservent leur peau blanche, et chacun sait que c'est au printemps que les habitants de la campagne voient leur teint brunir.

Cette coloration ne paraît pas devoir aller au delà d'un certain terme, et on ne peut admettre que le climat puisse modifier assez la couleur de la peau pour la changer complétement, du moins depuis les temps historiques; ainsi les Arabes et les Kabyles, de race blanche, bien qu'habitant des contrées méridionales où se trouvent des nègres, ont bien le teint basané, mais ne sont pas noirs; il faut les distinguer de ceux qui se sont mélangés à la race nègre. Toutefois, les observations de M. le Dr Simonot (1) sur certains Arabes de la rive droite du Sénégal, celles de M. Duveyrier (2) sur les populations du Sahara, montrent que selon l'habitat la couleur des individus de même race peut varier du noir proprement dit aux teintes plus ou moins basanées (3).

Le pelage des mammifères et des oiseaux reçoit également une influence de la lumière; leur dos est en général plus brun que le ventre, et leur pelage d'été est plus foncé que celui d'hiver. Peut-être doit-on faire intervenir l'action de la lumière conjointement avec celle de la chaleur pour expliquer pourquoi dans les régions équatoriales et tropicales se trouvent les animaux qui présentent les nuances les plus vives et les plus belles couleurs?

*Insolation.* — L'effet auquel on a donné le nom de coup de soleil est un érythème dû non pas à une élévation de température, mais à une insolation très-vive; car il y a des individus qui en sont atteints au printemps alors que la température est peu élevée. Une lumière artificielle suffisamment intense et placée très-près peut agir de même; ainsi l'arc voltaïque, quand il est produit par une pile puissante, donne un érythème semblable, ce qui montre bien que cette affection est due à l'influence de la

(1) *Bulletin de la Soc. d'anthropologie.*
(2) *Voyage au pays des Touareg.*
(3) De Quatrefages, *Rapport sur les progrès de l'anthropologie*, 1867.

lumière. Avec une pile à acide azotique de 600 éléments, l'arc voltaïque, d'après Despretz, a donné lieu rapidement à cet effet sur la figure des personnes placées à peu de distance des charbons polaires (1).

La partie violette et ultra-violette du rayonnement lumineux paraît être la cause de cette action, car les écrans en verre d'urane, qui absorbent presque toute la partie la plus réfrangible du spectre lumineux, préserve les yeux des opérateurs exposés à l'irradiation de l'arc voltaïque (2). L'action exercée sur la peau, comme la plupart des actions chimiques présentées sur les matières organiques, a donc lieu sous l'influence des rayons lumineux les plus réfrangibles.

Cette influence exercée par la lumière sur la peau, et qui se manifeste par une coloration plus ou moins marquée et par une inflammation quand elle est trop vive, pourrait peut-être exister à un bien moindre degré lors de l'action de la lumière diffuse; on pourrait alors concevoir que l'excitation qui en résulterait, par action secondaire, pourrait exercer quelque influence sur le jeu des organes. Ce ne serait donc que dans ces conditions, et en dehors bien entendu des phénomènes de la vision, que la lumière interviendrait dans les fonctions des animaux.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 29, p. 712.
(2) Brown-Sequard, *Journal de physiologie*, t. 1er, p. 627 (1858).

# LIVRE V.

## DE LA VISION.

Le plan de cet ouvrage ne comporte pas l'étude de la manière dont les rayons lumineux pénètrent dans l'œil pour nous fournir la notion des objets extérieurs, non plus que celle du mécanisme des sensations; la première est du ressort de l'optique géométrique, la seconde de la physiologie. On doit donc se préoccuper seulement des effets directement appréciables de la lumière sur l'organe de la vue; les effets de ce genre, tels par exemple que la phosphorescence de durée plus ou moins longue, que présentent certaines parties de l'œil sont excessivement restreints; les autres effets immédiats de la lumière sur notre organe visuel ne sont pour la plupart appréciables que par la sensation qu'ils nous font éprouver : il est donc impossible le plus souvent de démêler la part d'action de l'organe qui reçoit les impressions de celle de l'appareil sensitif qui porte ces impressions à la connaissance de notre être intelligent.

L'intervention de cet appareil est évidente dans l'appréciation du groupement des rayons suivant certaines directions, indépendamment de leur nature, c'est-à-dire de la couleur, appréciation d'où résultent les jugements que nous portons sur les objets extérieurs; mais on ne saurait absolument rien préciser à ce sujet quant aux impressions dépendant de la nature des rayons lumineux. On ne saurait dire, par exemple, si la combinaison des couleurs est une opération s'effectuant dans les milieux de l'œil, sur la rétine ou bien dans le cerveau.

Cette difficulté dans le classement des phénomènes visuels surprendra moins si l'on songe que l'on est réduit à des conjectures relativement au mode d'action de la lumière sur la partie sensible de notre œil, la rétine, là où l'on voit se souder l'appareil nerveux avec l'appareil optique. Est-ce une action purement mécanique comme le pensaient Newton, Melloni, Seebeck, etc., une action électrique directe suivant l'idée de M. Dubois-Reymond, une action calorifique ou photo-chimique

exercée sur les liquides en contact avec la rétine? La première hypothèse semble être la mieux en rapport avec les faits, et le mouvement vibratoire transmis à la rétine par les ondes lumineuses donne probablement aux tissus nerveux l'impression d'où résulte la sensation de la lumière.

il sera donc question des sensations lumineuses au point de vue de l'*intensité,* de la *durée,* et de l'*appréciation des couleurs*. Mais il est nécessaire auparavant de donner une description succincte de l'œil et de signaler quelques phénomènes accessoires dont il importe de pouvoir se rendre compte pour ne pas les confondre avec des effets d'un autre genre.

# CHAPITRE PREMIER.

## Constitution de l'œil.

### § 1er. *Description de l'œil humain. — Accommodation*

L'œil humain, qu'on peut regarder comme le type de l'organe visuel des vertébrés, se présente dans son aspect général comme un sphéroïde de révolution autour d'une droite dont la direction dans la figure 61 serait celle de EM.

La partie la plus extérieure de cet organe (abstraction faite des muscles moteurs, dont on voit deux en N et O) est constituée par une sorte de coque solide H, blanche, opaque, qu'on appelle la *sclérotique;* elle est représentée en blanc sur la figure. A la partie antérieure de l'œil, en A, sur un diamètre égal à peu près au tiers de celui du globe oculaire, cette coque est remplacée par une partie transparente, d'une courbure plus forte, qu'on appelle la *cornée transparente.*

En *m*, c'est-à-dire en un point situé sensiblement sur un plan diamétral horizontal, mais un peu du côté du nez, la sclérotique est percée d'un trou destiné à laisser passer le *nerf optique* M.

La cornée est composée de différentes couches, dont le détail ne saurait trouver place ici, non plus que les diverses particularités de son insertion dans la sclérotique.

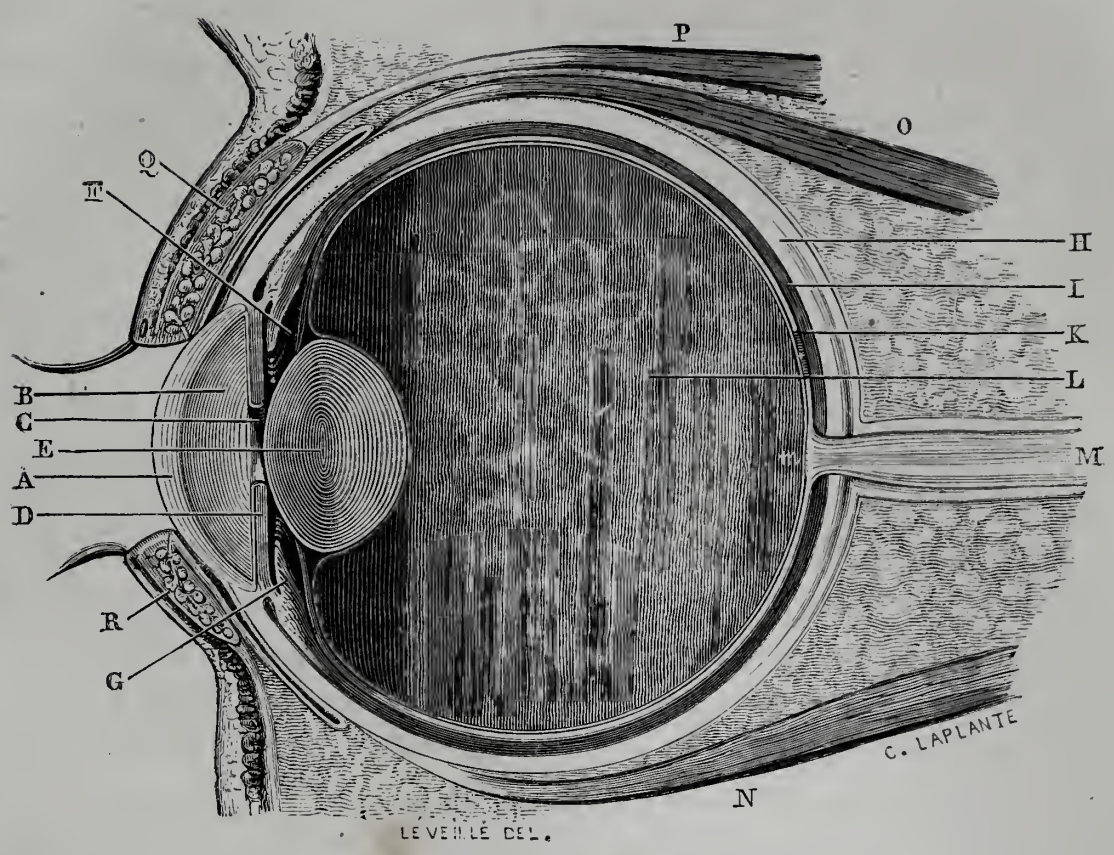



Fig. 61.

Après la sclérotique et la cornée, on rencontre le système de l'*uvée*, qui est composé de la *choroïde* et de l'*iris*.

La *choroïde* I est une membrane mince, d'une couleur foncée, qu'elle doit à des cellules pigmentaires; elle renferme une grande quantité de vaisseaux sanguins capillaires. Aux environs de la partie correspondante à la cornée transparente, en G, la choroïde affecte la forme de replis membraneux, au nombre de 70 environ, auxquels on donne le nom de *procès ciliaires*.

Le système de l'*uvée* se termine enfin par l'*iris*, sorte de diaphragme circulaire D percé d'une ouverture C qu'on appelle la *pupille*. Cette ouverture peut se rétrécir ou s'agrandir sous l'influence de certaines causes physiologiques, indépendantes de la volonté, de manière à permettre l'admission de faisceaux lumineux plus ou moins considérables. La dilatation de la pupille s'opère au moyen de fibres musculaires jusqu'ici mal définies; son rétrécissement est dû à la contraction d'un muscle circulaire, le *sphincter de la pupille*, qui entoure le bord de celle-ci sous la forme d'un anneau d'un millimètre environ de largeur.

Quand on regarde un œil vivant, l'iris paraît bombé par l'effet des réfractions de la partie antérieure de l'œil; mais il est sensiblement plan. C'est de la coloration de l'iris, variable avec les individus, que dépend ce que l'on appelle généralement la *couleur des yeux.*

Après la choroïde on trouve l'intérieur de l'œil tapissé d'une membrane très-mince K (représentée en blanc sur la figure), qui peut être considérée comme l'épanouissement d'une masse nerveuse concentrée en *m*, point d'insertion du nerf optique. Quoique cette membrane soit bien mince (son épaisseur varie de $0^{mm},22$ au fond de l'œil, à $0^{mm},09$ vers la partie antérieure), l'examen microscopique a pu y faire distinguer une série de huit à dix couches présentant des caractères plus ou moins tranchés, dont le détail ne saurait trouver place ici.

Dans une région située entre K et L, la rétine de l'homme, ainsi que celle du singe, présente sur un espace très-restreint une couleur jaune caractéristique, qui lui a fait donner le nom de *tache jaune* (*macula lutea*). Au centre de la tache jaune se remarque une légère dépression très-transparente, à laquelle on donne le nom de *fovea centralis.*

La tache jaune est caractérisée par quelques particularités anatomiques, encore peu étudiées; mais on sait d'autre part que c'est le lieu de la vision la plus distincte, c'est-à-dire que lorsqu'on veut examiner en détail une région déterminée de quelque objet, on donne à l'œil une direction telle que l'image de cette partie de l'objet vienne se faire sur la tache jaune.

La rétine possède un système spécial de vaisseaux sanguins, artériels et veineux, qui pénètrent dans l'œil par l'axe du nerf optique. Dans sa partie antérieure la rétine change de constitution en venant se souder aux procès ciliaires.

Comme dernière enveloppe intérieure de l'œil, on trouve la *membrane hyaloïde,* très-mince, parfaitement transparente, qui recouvre toute la rétine à laquelle elle est adhérente. A sa partie antérieure, la membrane hyaloïde porte le *cristallin* E, aux bords postérieurs duquel elle se soude, tandis qu'une autre membrane plissée F, appelée la *zonule de Zinn*, le maintient par sa partie antérieure.

Par sa face antérieure, le cristallin est en contact avec l'iris, au moins lorsque celui-ci est moyennement ouvert.

Le cristallin est une masse organisée, de consistance gélatineuse, dont la dureté et la densité paraissent augmenter de la circonférence au centre, et qui est contenue dans une enveloppe membraneuse mince,

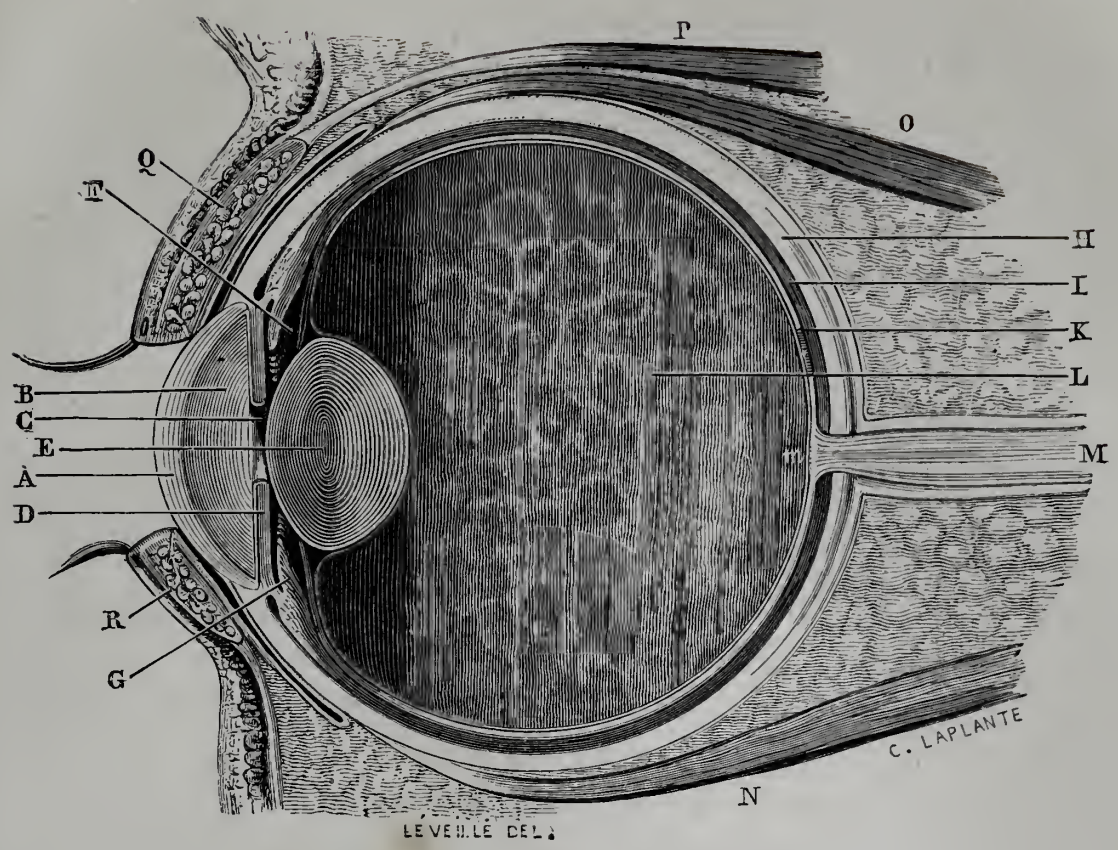



Fig. 61.

transparente, qu'on appelle la *capsule du cristallin.* Toute la masse du cristallin est constituée par des fibres microscopiques de section hexagonale formant des couches dont la disposition est peu connue, mais qui ont pour effet de donner au cristallin une certaine élasticité, tout en assurant la permanence de la forme primitive lorsque les actions qui tendent à la modifier viennent à cesser.

Le cristallin se comporte comme un milieu biréfringent; placé entre deux tourmalines ou deux prismes de Nicol, il présente la croix et les anneaux des cristaux uniaxes taillés perpendiculairement à leur axe optique.

La courbure du cristallin n'est pas la même sur ses deux faces. D'après M. Krause (1) la surface antérieure se rapprocherait de celle d'un ellipsoïde de révolution aplati, et sa surface postérieure serait celle d'un paraboloïde de révolution.

Tous les organes que l'on vient de décrire partagent l'œil en deux cavités bien distinctes : la première, comprise entre la cornée transparente A et la surface antérieure du cristallin, la seconde entre la surface postérieure du cristallin et la membrane hyaloïde.

(1) *Die brechungs indices,* etc... Hanovre, 1855.— Helmholtz, *Optique physiolog.*, p. 110.

Le premier de ces espaces, que l'on appelait autrefois *chambre antérieure* de l'œil, est rempli d'un liquide qui n'est autre chose que de l'eau renfermant seulement 2 pour 100 de sel marin et quelques matières organiques, et dont l'indice de réfraction diffère très-peu de celui de l'eau; ce liquide est l'*humeur aqueuse*.

L'espace enveloppé par la membrane hyaloïde est rempli par le *corps vitré*, sorte de masse de consistance gélatineuse, formée d'une partie fluide se rapprochant de la composition de l'humeur aqueuse et d'une matière mucilagineuse; on ne sait si cette dernière matière n'est pas disposée sous forme de filets irréguliers ou de membranes.

D'après M. Listing (1) on pourrait regarder les indices de réfraction de l'humeur aqueuse et du corps vitré comme égaux à 1,337, et celui du cristallin à 1,454. On voit d'après cela que le cristallin est plus réfringent que le milieu qui l'entoure, et il contribue à augmenter la convergence des faisceaux lumineux déterminée par leur première rencontre avec la surface convexe de la cornée.

L'œil des vertébrés fonctionne donc comme une véritable chambre noire, assimilable à celles que l'on met en usage pour la fixation des images par la photographie. Le système de la cornée, du cristallin et des liquides de l'œil, constitue un objectif composé, qui donne sur le fond de l'œil occupé par la rétine, des images réduites et renversées des objets lumineux extérieurs.

On sait qu'étant donné un système optique convergent, les images d'objets situés à des distances diverses de ce système se forment à des distances différentes; si donc certains objets sont tellement placés que leur image se produise nettement sur la rétine, des objets situés plus loin ou plus près donneront des images confuses; on sait cependant qu'il nous est possible de voir distinctement des objets situés à des distances très-différentes, mais l'expérience journalière montre que leur perception distincte ne peut être simultanée, et qu'il faut que l'œil s'*accommode* à la distance de l'objet que l'on veut examiner.

Cette accommodation de l'œil est une opération instinctive; on a été pendant longtemps réduit à des conjectures sur les modifications que subissait l'appareil oculaire pendant l'accommodation; mais depuis les travaux de M. Helmholtz sur ce sujet (2), on peut regarder comme certain que la courbure des deux surfaces du cristallin varie de telle

(1) *Beitrag zur physiologischen optik*. Gottingue, 1845.
(2) Helmholtz, ouvrage déjà cité, page 121 et suiv.

sorte que cette courbure diminue pour l'accommodation à de grandes distances et augmente pour les petites. On ne peut d'ailleurs rien préciser sur le mécanisme qui détermine ces changements de courbure, mais il n'y a guère que le muscle ciliaire à l'action duquel on puisse les attribuer. Des expériences précises ont montré que, contrairement à une opinion souvent émise, il n'y avait pendant l'accommodation aucune variation dans la longueur de l'axe oculaire.

L'iris contribue d'une manière accessoire à l'accommodation; l'ouverture de la pupille se resserre dans l'accommodation pour les objets rapprochés, s'élargit dans celle pour les objets éloignés. Il est probable que le retrécissement de la pupille dans la vision des objets rapprochés a pour objet d'empêcher les aberrations produites par des rayons s'écartant trop de l'axe optique.

### § 2. *Absorption, diffusion et transformation des différents rayons par les milieux de l'œil.*

L'humeur aqueuse et le corps vitré, qui sont de l'eau presque pure, absorbent en très-grande proportion les rayons calorifiques obscurs ou faiblement lumineux. D'après M. Cima (1) le cristallin laisserait passer 13 pour 100, le corps vitré 9 pour 100 et l'œil entier également 9 pour 100 de la partie calorifique du rayonnement d'une lampe Locatelli.

MM. Janssen (2) et Frantz (3) ont trouvé que l'œil présentait, au point de vue de l'absorption de la chaleur, des propriétés sensiblement égales à celles de l'eau. Seulement, d'après M. Frantz, le pouvoir absorbant de la cornée et du cristallin, pour les rayons rouges, serait un peu plus considérable que celui de l'eau.

M. Tyndall (4) a pu, avec des précautions particulières sans lesquelles l'expérience pourrait être dangereuse; admettre dans son œil un faisceau concentré de rayons provenant des charbons incandescents d'une lampe électrique, rayons qui étaient dépouillés de toute la partie lumineuse par leur passage à travers une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone; dans ces conditions, il n'éprouva aucune sensation de cha-

(1) *Sul potere degli umori dell'occhio*, Turin (1852).

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. LX, p. 61 (1860).

(3) *Ann. de Poggend.*, t. CXV, p. 266, 1862. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XVI, p. 140 (1863).

(4) Tyndall, *Sur la radiation* (1865). — *Philos. Transact.*, t. CLVI (1866).

leur au fond de l'œil. Il n'en était pas de même pour les paupières si le faisceau venait à les rencontrer. Une lame de platine platinée, mise à la place occupée par l'œil, fut portée en un instant au rouge vif : ce résultat montre que l'on doit prendre les précautions les plus grandes pour répéter de telles expériences.

Les rayons ultra-violets aussi sont absorbables par les milieux de l'œil, mais en beaucoup moins grande proportion que les rayons infra-rouges. D'après MM. Brücke, Donders, Rees, la lumière ultra-violette qui a traversé un œil de bœuf produit encore la phosphorescence de la solution de bisulfate de quinine, et impressionne les substances photographiques. D'après M. Brücke (1) c'est surtout le cristallin qui jouit de la propriété d'absorber les rayons ultra-violets.

On peut d'ailleurs reconnaître, même sur le vivant, que la cornée et surtout le cristallin présentent une phosphorescence à durée plus ou moins longue. (Voir tome Ier, page 319.) D'après M. Helmholtz la rétine elle-même est phosphorescente à un degré un peu moindre que le papier, la toile ou l'ivoire. Pour reconnaître ces faibles degrés de phosphorescence, il faut placer la substance dans la partie ultra-violette d'un spectre bien épuré produit par des lentilles et un prisme en quartz, et les examiner au travers d'un verre d'urane, qui puisse absorber la lumière renvoyée simplement par diffusion, pour ne laisser arriver à l'œil que celle dont le degré de réfrangibilité a diminué par la transformation propre aux substances phosphorescentes.

Il résulte de là que bien que les milieux de l'œil absorbent en grande partie les rayons infra-rouges et en plus faible proportion les rayons ultra-violets, il pourrait en arriver encore assez à la rétine pour qu'elle pût les percevoir si elle était aussi sensible à leur impression qu'à celle des autres rayons colorés ; si la rétine a son action ordinairement limitée aux derniers rayons visibles rouges et violets, c'est-à-dire en deçà de la raie A et un peu au-delà de H, il faut qu'elle ne soit surtout sensible qu'entre ces limites extrêmes de réfrangibilité et qu'elle ne soit pas également impressionnée par les vibrations éthérées quelle que soit leur longueur d'onde. Quant à la vision des rayons situés au-delà du violet et dans les circonstances qui ont été rapportées tome Ier, page 141, il est possible qu'elle n'ait pas lieu habituellement en raison du peu d'intensité

(1) Brücke, *Muller's Archiv. für Anat. und Physiol.*, 1845-46. — Poggendorf, *Annalen*, t. LXV, pag. 593 ; t. LXIX, pag. 549.

de ces rayons ; on reviendra du reste plus loin sur ce sujet, page 340. On voit néanmoins que la rétine se trouve dans des conditions analogues à celles des différentes matières impressionnables, soit par phosphorescence, soit par action chimique, puisque l'on a vu que chacune d'elles était sensible entre des limites particulières de réfrangibilité.

Les milieux de l'œil peuvent d'ailleurs s'illuminer par les rayons qui n'éprouvent pas d'absorption, et cet effet est produit par une diffusion latérale ; en outre, la rétine elle-même peut réfléchir une certaine quantité de lumière qui lui est ensuite renvoyée par les autres parties de l'œil, et il en résulte que lorsqu'une grande quantité de lumière pénètre dans l'organe, il s'en répand toujours des quantités sensibles sur le champ de la vision. Entre autres expériences propres à mettre ce fait en évidence on peut citer celle-ci : « Si l'on voit, dit M. Helmholtz (1), une flamme lu-
« mineuse en avant d'un champ très-obscur, par exemple devant l'ou-
« verture d'une porte qui donne dans une chambre tout à fait sombre,
« la lumière paraît entourée d'un nuage blanchâtre dont la plus grande
« intensité appartient aux points où il touche la flamme. On remarque
« mieux encore ce reflet lumineux lorsqu'on amène un petit corps opaque
« entre l'œil et la lumière, de manière à masquer la flamme : aussitôt le
« brouillard lumineux disparaît, et le fond reprend la coloration noire
« qui lui est propre. Si la lumière est colorée, le nuage lumineux co-
« loré diffusé présente naturellement la même couleur. Je crois que,
« dans ce cas encore, le nuage lumineux provient certainement de la
« diffusion de la lumière objective, car la distribution de la lumière
« diffuse ne diffère pas de celle que donnerait, dans les mêmes condi-
« tions, un système de lentilles de verre. Pour la lumière bleue, on voit
« encore s'ajouter la lumière blanc bleuâtre diffusée par la fluorescence
« du cristallin, et qui s'étend également sur tout le fond de l'œil. »

Cette quantité de lumière diffusée ainsi par diverses causes peut varier avec les individus, et surtout avec l'état pathologique qui peut modifier la nature des milieux, au point de vue, soit de leur limpidité, soit de leur propriété de donner, par phosphorescence, des rayons d'une autre longueur d'onde que celle des rayons incidents.

En résumé, on voit qu'en dehors des images que forment les rayons directs, la rétine peut recevoir de la lumière diffuse provenant d'une imperfection de la partie pigmentaire de la choroïde (albinisme), des ré-

(1) *Optique physiologique*, page 526.

flexions qui ont lieu aux changements de milieux, de la diffusion dans les milieux plus ou moins troubles, enfin de la diffusion par phosphorescence.

### § 3. *Défaut d'achromatisme de l'œil.*

Les rayons de diverses réfrangibilités dont se compose un faisceau de lumière blanche ne suivent pas le même chemin dans l'intérieur de l'œil ; pour que cela eût lieu il faudrait que les milieux traversés présentassent des dispersions ayant des différences convenables ; or on sait que les différentes parties de l'œil sont, sous le rapport de leurs propriétés optiques, presque identiques à de l'eau pure. Les choses se passent donc pour l'œil comme pour les lentilles formées d'une seule substance réfringente : des rayons de lumière blanche émis par un même point lumineux donnent, après leur passage dans la lentille, des foyers distincts pour les rayons des diverses réfrangibilités. Ces foyers sont d'autant plus rapprochés de la lentille qu'ils appartiennent à des rayons plus réfrangibles.

Il arrivera donc que si on regarde un point lumineux, la rétine pourra, pour une certaine accommodation de l'œil, recevoir l'impression produite par des cercles superposés de différentes couleurs ; on verra une image centrale blanche entourée de cercles de diffusion de diverses teintes parmi lesquelles domineront le rouge et le violet. L'accommodation sera aussi parfaite que possible lorsque les cercles de diffusion des couleurs rouge et violette se trouveront égaux. C'est ainsi qu'à notre insu les choses se passent dans la plupart des cas ; aussi a-t-on longtemps regardé comme une vérité évidente à priori que l'œil était achromatique ; c'était l'opinion d'Euler, entre autres. On conçoit cependant que les circonstances qui permettent cette accommodation moyenne ne se présenteront pas toujours ; par exemple si on accommode l'œil pour voir un certain objet médiocrement lumineux et que dans une direction peu différente et à une autre distance il s'en rencontre un autre assez notablement éclairé, l'image de celui-ci apparaîtra bordée de franges irisées.

L'achromatisme de l'œil fut d'abord révoqué en doute par Young (1), qui trouva que son optomètre donnait la sensation du rouge et du bleu en deçà et au delà de la distance de vision distincte.

Wollaston (2) remarqua qu'en regardant un point lumineux au travers

(1) *Philosophical Transactions*, t. LXXIX, p. 258.
(2) Id., t. LXXXI, 1re partie, p. 50 (1801.)

d'un prisme de façon à donner lieu à une spectre linéaire, il était impossible de voir nettement à la fois les deux extrémités de ce spectre.

Arago (1) varia de différentes manières l'expérience de Wollaston; il reconnut que pour voir nettement un astre dans une lunette il fallait enfoncer l'oculaire de quantités différentes lorsqu'on interposait entre l'œil et la lunette des verres diversement colorés.

C'est en éclairant des fils fins par des lumières monochromatiques que divers observateurs, Fraunhofer et Matthiessen, entre autres, ont cherché à mesurer la distance des foyers formés par les différentes couleurs. Le procédé employé par M. Helmholtz (2) pour ces évaluations consiste à éclairer, au moyen de la lumière des différentes couleurs séparées par un prisme, une très-petite ouverture pratiquée dans un écran obscur, et à chercher la plus grande distance à laquelle l'œil peut la voir sous forme d'un point lumineux. Ce physicien a trouvé ainsi que la plus grande distance visuelle de son œil étant de 2 mètres $\frac{6}{10}$ environ dans la lumière rouge, elle n'était plus que de 50 centimètres dans la lumière violette, et qu'elle descendait au-dessous de 20 centimètres pour les rayons ultra-violets les plus réfrangibles de la lumière solaire. Pour un œil accommodé sur l'infini, la différence des distances focales oculaires correspondantes aux rayons rouges et violets est d'environ $0^{mm},6$.

Quand on observe un petit orifice éclairé par un mélange de rayons rouges et violets (tel que le mélange que laissent passer certains verres d'un bleu foncé colorés par le cobalt), on observe des apparences diverses qui s'expliquent par la différence des accommodations relatives aux différentes couleurs. Si l'œil est accommodé pour les rayons rouges, on voit une image rouge entourée d'une auréole violette; le contraire a lieu lorsque l'œil est accommodé pour les rayons violets; enfin on peut trouver une accommodation telle que l'image de l'orifice paraisse nette et elle possède alors la teinte composée qui convient au mélange des couleurs employées.

M. Le Roux (3) a fait un autre usage de l'éclairement bichromatique d'un petit orifice pour démontrer, par une expérience tout à fait objective, que les faisceaux de rayons de réfrangibilités différentes suivent dans l'œil des chemins différents.

On sait que si sur une lentille non achromatique AB (fig. 62) on fait

(1) Vallée, *Théorie de l'œil*, Paris, 1844, Ire part., p. 332.
(2) *Optique physiologique*, p. 173.
(3) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LXVI, p. 173.

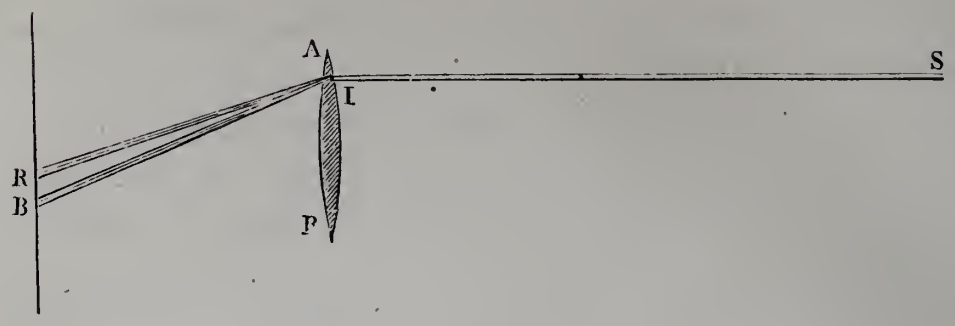



Fig. 62.

tomber un pinceau lumineux S I, parallèle ou à peu près à l'axe de figure de cette lentille, ce pinceau supposé homogène sera d'autant plus dévié de sa direction qu'il rencontrera la lentille en un point plus éloigné de son centre de figure. Si ce pinceau, au lieu d'être homogène, est composé de deux espèces de rayons, le rouge et le bleu par exemple, les rayons de ces deux couleurs seront séparés l'un de l'autre et donneront lieu à deux pinceaux émergents dont l'intersection avec un écran fournira deux images, l'une bleue, l'autre rouge. Un milieu réfringent terminé par une seule surface courbe, et c'est à très-peu près le cas de l'œil, produirait le même effet.

Une manière très-simple de soumettre à cette épreuve le système convergent de l'œil consiste à regarder le soleil à travers un petit orifice *t* de quelques dixièmes de millimètre, devant lequel on place un verre bleu-violet BB′ (fig. 63) qui laisse passer en quantité à peu près égales les

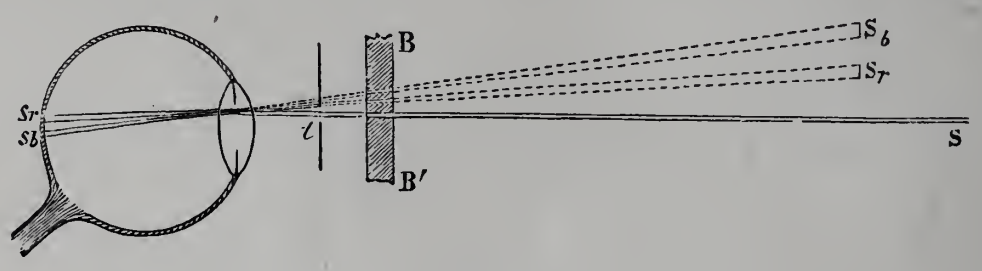



Fig. 63.

rayons rouges et bleus. On n'admet ainsi dans l'œil qu'un faisceau de lumière très-étroit; s'il y pénètre par la partie centrale de l'ouverture de la pupille, on ne perçoit qu'une seule image du soleil qui est alors colorée de la teinte du verre employé; mais si on déplace l'œil latéralement dans quelque sens que ce soit, cette image se dédouble et au lieu d'un seul disque on en aperçoit deux, l'un rouge $S_r$, l'autre bleu $S_b$, d'autant plus séparés que le faisceau lumineux pénètre dans l'œil plus loin du centre de la pupille. Le sens du déplacement des rayons est tel que

l'indique la figure, et concorde avec celui que fait prévoir la réfrangibilité des rayons.

Si on supprimait la partie supérieure de l'écran à l'endroit de l'orifice *t*, cela ne changerait rien aux circonstances principales du phénomène ; seulement le faisceau lumineux, au lieu d'être limité en haut et en bas par les bords de l'orifice, le serait en haut par la pupille et en bas par le bord de l'écran. On peut donc dire que les apparences de dispersion oculaire qui viennent d'être fournies par un petit orifice, pourront l'être par le bord d'un écran placé convenablement devant l'œil.

Brewster et d'autres physiciens avant et après lui ont fait une expérience de ce genre (1) en regardant le fond éclairé du ciel, et en mettant un doigt devant l'œil ; lorsque les circonstances d'éclairement sont favorables, on aperçoit ainsi une sorte de spectre plus ou moins nettement dessiné.

M. Le Roux a employé encore une autre disposition qui rend l'expérience indiquée ci-dessus plus facile à répéter et plus nette. Au lieu de regarder le soleil à travers un petit orifice *t* on peut simplement regarder cet orifice en l'éclairant au moyen de la lumière solaire réduite au rouge et au bleu par l'interposition d'un verre convenable. Mais il faut placer en avant de l'orifice un oculaire qui empêche le faisceau de s'élargir avant de pénétrer dans l'œil. Grâce à cette disposition, on peut voir les deux images de l'ouverture entièrement séparées l'une de l'autre.

La figure 64 représentée ci-contre rend compte de la marche des

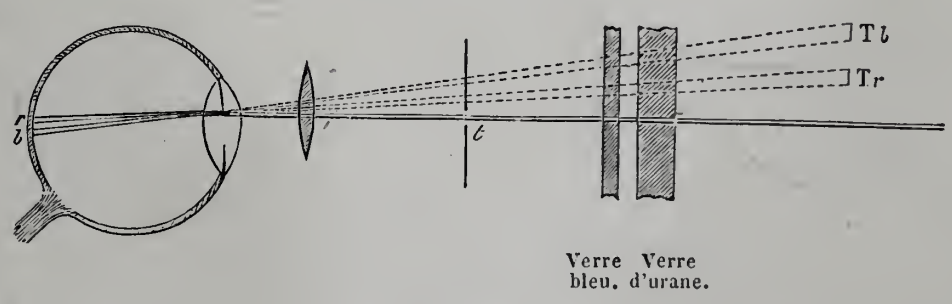



Fig. 64.

rayons lumineux ; $T_b$ et $T_r$ sont les images virtuelles dont l'œil perçoit la sensation.

L'effet de séparation est d'ailleurs d'autant plus marqué que le faisceau lumineux pénètre dans l'œil plus excentriquement, et par conséquent que la pupille est plus dilatée. On facilite cette dilatation en

(1) Voir pour le détail de ces expériences : Trouessart, *Recherches sur quelques phénomènes de la vision ;* Brest, 1854.

s'entourant la tête d'une étoffe noire qui empêche la lumière de pénétrer latéralement dans l'œil.

Il y a avantage à placer, comme la figure l'indique, en avant du verre bleu, un verre d'urane d'au moins un centimètre d'épaisseur. Ce verre absorbe les rayons ultra-violets que le verre bleu laisse passer, et qui, par l'illumination qu'ils produisent dans l'œil, troubleraient l'observation.

### § 4. *Appareils destinés à l'étude de l'œil. Ophthalmoscopes. — Effets entoptiques.*

La possibilité d'observer le fond de l'œil paraît avoir été entrevue depuis longtemps par divers observateurs ; mais c'est M. Helmholtz qui a le premier résolu la question et doté les sciences physiques et médicales d'un nouveau moyen d'exploration dont les résultats ont été déjà très-féconds. Les appareils qui permettent d'observer sur le vivant l'intérieur de l'œil et surtout la surface de la rétine ont été nommés ophthalmoscopes; leurs dispositions ont déjà beaucoup varié ; nous nous contenterons d'indiquer ici les principes sur lesquels ils sont fondés et nous ne décrirons que les plus usités (1).

Le système optique de l'œil humain peut être considéré comme équivalant à une lentille convergente donnant sur la rétine l'image nette d'un objet extérieur si cet œil est accommodé pour voir distinctement l'objet. D'après le principe de la marche inverse des rayons, si l'image qui se forme au fond de l'œil était remplacée par un objet lumineux, ce même système optique en donnerait au dehors une image considérablement agrandie. Mais au fond de l'œil se trouvent la rétine et les divers organes qui l'accompagnent; si nous les supposons suffisamment éclairés, ils donneront au dehors une image, et un observateur se plaçant à une distance de cette image égale à la distance de la vision distincte percevra une image renversée et agrandie des organes qui occupent le fond de l'œil.

C'est là l'ophthalmoscopie naturelle; malheureusement elle est à peu près impossible à pratiquer, à cause du peu d'intensité de l'image des parties en question, de l'exiguïté du champ et surtout de cette condition difficile à remplir que l'œil observé doit rester toujours semblablement accommodé. On peut de deux manières différentes modifier ces

(1) Helmholtz, ouvrage déjà cité, page 239.

conditions de façon à produire des images de la rétine, soit réelles, soit virtuelles, plus commodes à observer :

Quand on place près de l'œil observé une lentille convexe de quelques centimètres de foyer, comme le représente la figure 65, on aug-

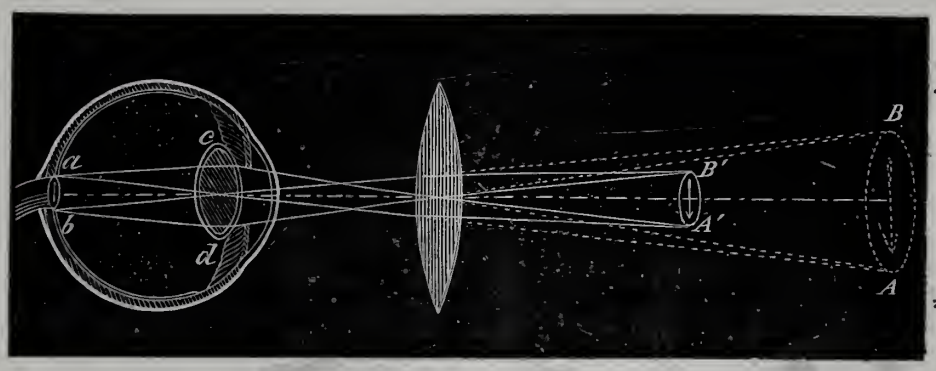



Fig. 65.

mente la convergence du système optique de l'œil, de manière à rapprocher en A' B' l'image renversée *ab* du fond de l'œil, qui sans cette interposition se serait formée en A B. L'observateur vient ensuite examiner à la loupe cette image A' B' comme on examine les images formées au foyer de l'objectif d'une lunette ou d'un microscope.

Si, au lieu d'une lentille convexe, on place en avant de l'œil observé une lentille concave, on a, dans ce cas, une image virtuelle qui a l'avantage d'être droite, car la lentille concave se combine avec le système optique de l'œil observé, de façon à faire l'office d'une loupe composée de telle sorte que la rétine peut se peindre virtuellement à la distance de la vision distincte de l'observateur.

Quelque procédé que l'on emploie, on est gêné par la pupille de l'œil observé, et lorsqu'on veut explorer la rétine sur une surface très-étendue on est obligé d'avoir recours à la dilatation artificielle de la pupille au moyen de l'atropine.

Dans l'un ou l'autre des systèmes indiqués une des conditions les plus importantes à remplir est celle d'un bon éclairage. L'éclairage direct, qui consiste à placer une lumière dans le voisinage de l'œil observé, en la cachant par un écran à l'œil de l'observateur, est le plus souvent impossible à réaliser. Le mieux est d'amener dans l'œil la lumière provenant d'une source placée en avant de l'observateur ; on l'y dirige par un système convenable de lentilles et par un miroir percé d'un orifice par lequel l'observateur regarde; cette disposition est ana-

logue à celle du miroir percé de Lieberkühn dont on munit les microscopes pour éclairer la surface des objets opaques.

La figure 66 montre un éclairage disposé pour l'observation de l'i-

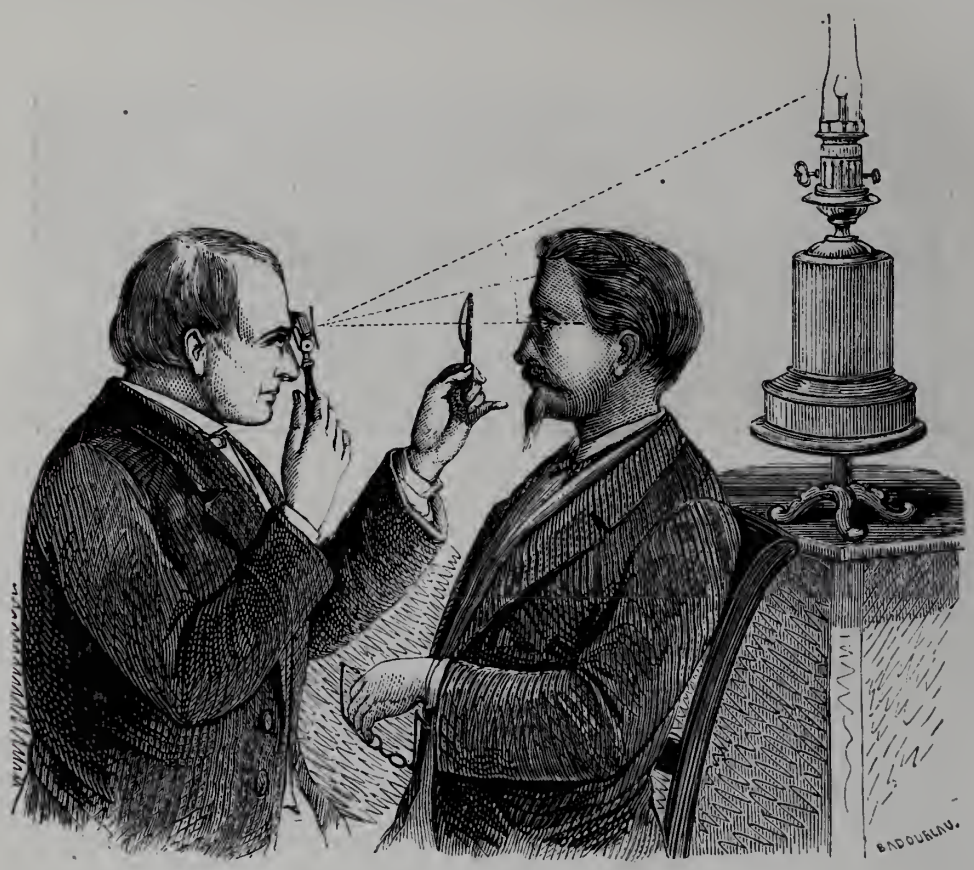


Fig. 66.

mage réelle renversée. La lumière provient d'une lampe placée derrière la tête de la personne que l'on examine; elle est dirigée convenablement au moyen d'un miroir portant une ouverture par laquelle regarde l'observateur. Quelquefois la lampe est placée latéralement.

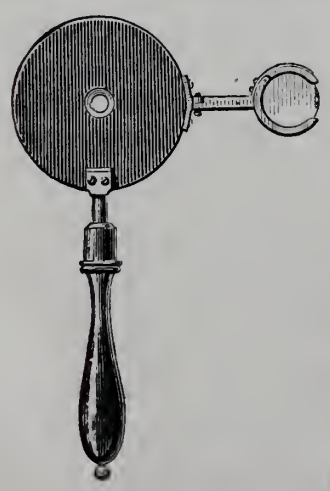


Fig. 67.

On a varié la disposition du miroir : dans l'ophthalmoscope de Coccius il est plan, concave dans celui de Ruete et convexe dans celui de Zehender.

Parmi les ophthalmoscopes on distingue les appareils à main et les appareils fixes. La fig. 67 représente un ophtalmoscope à main employé par M. Desmares et d'un fréquent usage. Il se compose d'un miroir concave en verre étamé, en argent ou en acier; ce miroir, fixé à un manche, a une distance focale de 20 à 25 centimètres et est

percé à son centre d'un orifice de 3 millimètres de diamètre environ. Il est accompagné d'un ou de plusieurs verres concaves et convexes ayant 24, 15 ou 20 pouces de distance focale, suivant que l'observateur est myope ou presbyte; ces verres peuvent se placer dans une pièce à charnière vue sur le côté, pouvant se rabattre sur l'appareil. La lentille convexe, que l'on approche de l'œil observé, doit avoir 2 pouces $\frac{1}{4}$ environ de distance focale.

La fig. 68 représente un ophthalcosmopeconstruit par M. A. Che-

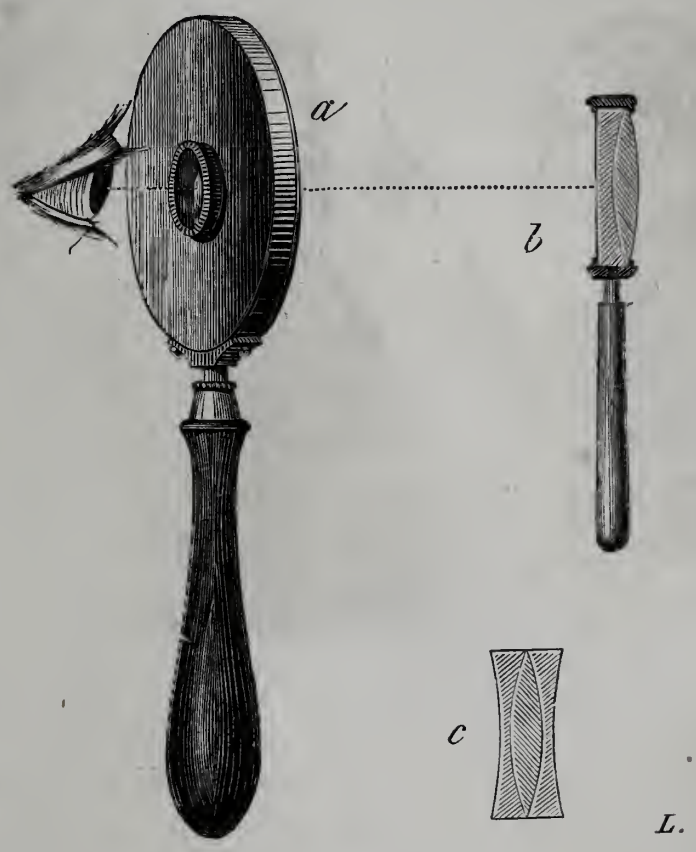



Fig. 68.

valier à l'aide de lentilles achromatiques. *a* est l'appareil composé d'un miroir concave et d'une lentille oculaire; *b* est la lentille objective qui modifie dans le sens convenable l'image du fond de la rétine que tend à fournir le système optique de l'œil, comme on l'a expliqué ci-dessus. Cette image est examinée au moyen d'un oculaire concave, dont on voit la coupe en *c*, lequel forme avec l'objectif *b* comme une lunette de Galilée.

Quand on examine ainsi les yeux normaux avec un ophthalmoscope, le fond de l'œil paraît rouge; seule, la partie où pénètre le nerf optique, et que l'on nomme la *papille*, semble blanc clair. Sur le fond rouge on

distingue les ramifications des vaisseaux de la rétine, vaisseaux dont les troncs principaux apparaissent au milieu du nerf optique ; les artères se reconnaissent à leur couleur rouge claire. Souvent, surtout dans les parties latérales, on reconnaît les vaisseaux de la choroïde. Ce sont les changements qui se produisent dans l'image ainsi observée qui peuvent guider les praticiens pour le traitement de certaines maladies des yeux.

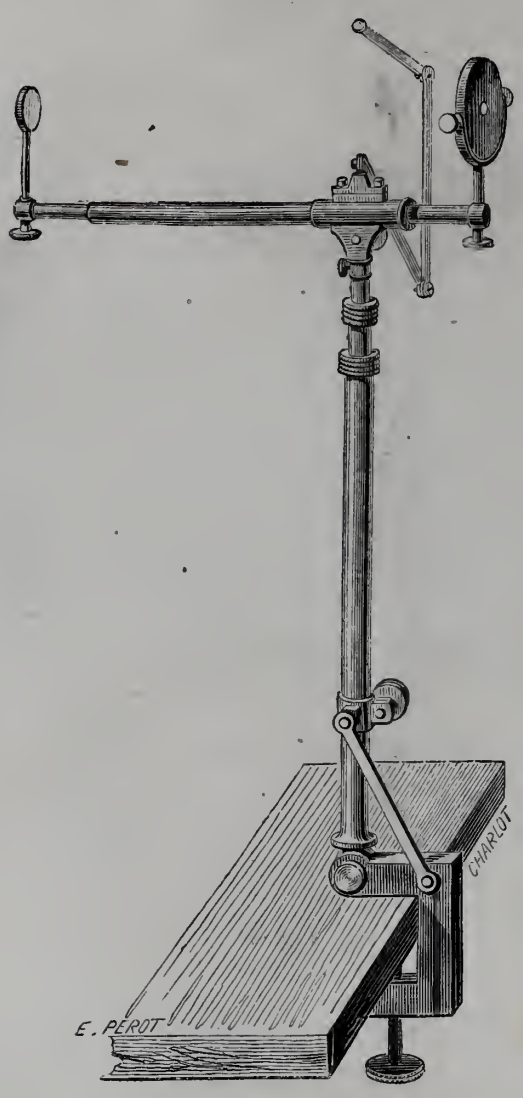



Fig. 69.

Les appareils simples à main ne sont pas les seuls qui soient employés pour l'étude des parties intérieures de l'œil : quelquefois, quand il s'agit d'un examen un peu prolongé, on se sert d'ophthalmoscopes fixes ; la fig. 69 donne une disposition d'un appareil de ce genre. La lentille objective située à gauche se place près de l'œil observé ; l'oculaire réuni au miroir est situé à droite, et une tige articulée terminée par

une sphère, sert à diriger le regard de la personne que l'on examine.

M. Giraud-Teulon (1) a fait usage d'un ophthalmoscope binoculaire stéréoscopique, donnant la sensation de relief et construit par M. Nachet, lequel a utilisé le système de prismes à réflexion totale qu'il avait appliqué au microscope binoculaire. Cet appareil est représenté fig. 70. La partie

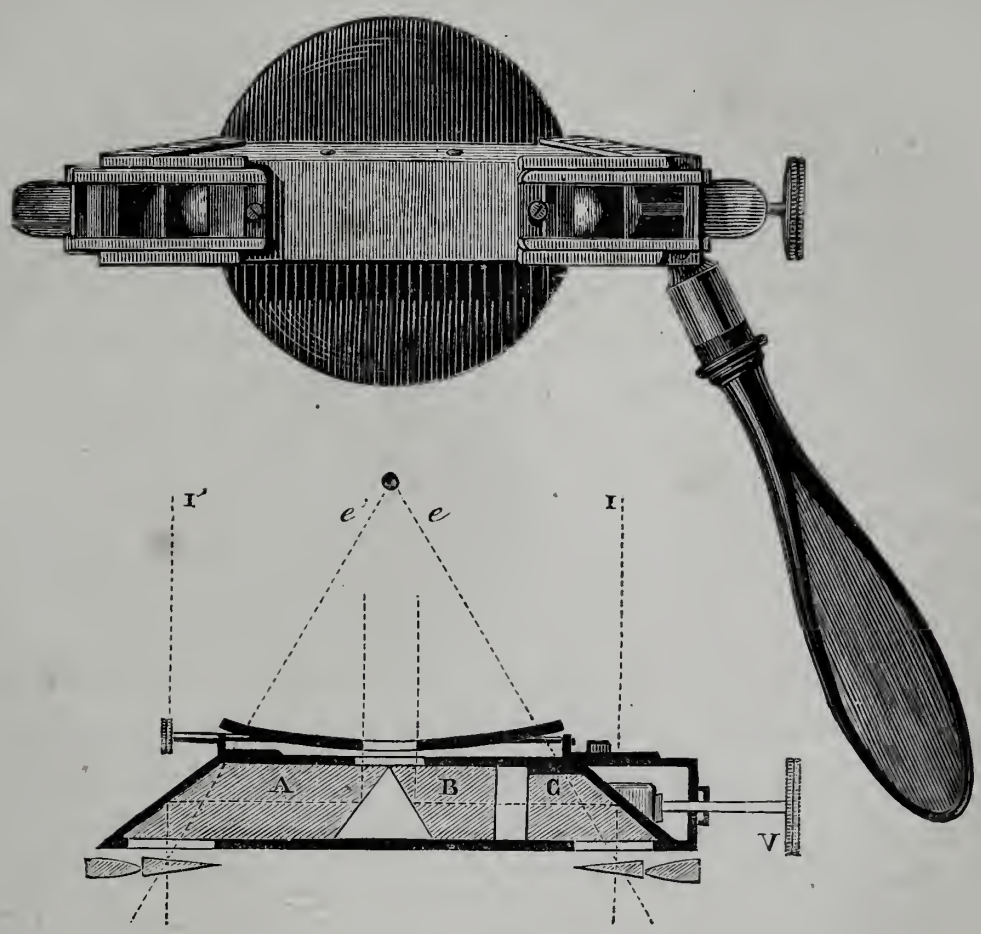



Fig. 70.

supérieure représente l'appareil, et la partie inférieure sa coupe théorique. Un des deux prismes A est fixe; l'autre est divisé en deux parties, l'une fixe B, l'autre C mobile au moyen d'une vis V.

Les deux yeux visent par des ouvertures les deux images du fond de l'œil après deux réflexions totales qui les feraient paraître en I et I' sans l'interposition des demi-lentilles; celles-ci, par un effet de réfraction, comme dans le stéréoscope, font coïncider ces images en *e e'*; on a donc en *e e'* l'image du fond de l'œil avec la sensation de relief due à la vision binoculaire simultanée.

(1) Giraud-Teulon, *Vision binoculaire*, 1861. — Zander, *l'Ophthalmoscope*.

Dans son ophthalmoscope, M. Helmholtz emploie, comme éclaireur, au lieu d'un miroir un certain nombre de lames de verre superposées. « Quand on examine, dit-il (1), des yeux normaux sans employer l'atro- « pine, on pourrait obtenir la même intensité par l'un ou l'autre procédé « d'éclairage, si les pupilles étaient immobiles. Mais le miroir étamé en- « voie, en somme, plus de lumière dans l'œil observé, l'éblouit davantage, « ce qui cause une contraction plus considérable de la pupille, de telle « sorte que, dans ces conditions, le miroir non étamé peut donner un « plus grand champ visuel et une plus grande intensité. En outre, il « éclaire d'une manière uniforme la portion de rétine que l'on exa- « mine, tandis qu'avec le miroir percé, l'image de diffusion du trou « rend l'éclairage irrégulier. Enfin le reflet cornéen est moins gênant avec « le miroir non étamé, parce que la lumière réfléchie par le miroir « est plus ou moins polarisée, et qu'étant renvoyée par la cornée sans « changement dans sa polarisation, elle ne traverse qu'en faible propor- « tion les lames de verre..... Cet ophthalmoscope à main, le plus ancien- « nement décrit, est celui dont l'usage est préférable. Un œil sain peut « supporter, pendant des heures sans en être ébloui, l'éclairage que « donne ce miroir. C'est ainsi qu'il m'est souvent arrivé de montrer « successivement, avec cet instrument, ma rétine à vingt étudiants, « sans en éprouver d'incommodité, tandis que l'œil ne peut guère sup- « porter pendant plus de cinq minutes l'éclairage au moyen des miroirs « étamés sans être fortement ébloui. Aussi je préfère ce miroir aux autres « pour la plupart des expériences physiologiques. Pour les oculistes, « au contraire, il est plus avantageux d'avoir le champ visuel très- « étendu et fortement éclairé, en sacrifiant le grossissement; aussi em- « ploient-ils, le plus souvent, des miroirs étamés percés et des lentilles « convexes. »

On a imaginé beaucoup d'autres formes d'appareils pour lesquels on peut consulter les ouvrages spéciaux publiés sur ce sujet (2). D'après des dispositions particulières, il est même possible de voir soi-même les différentes parties de la rétine, et l'on forme ainsi ce que l'on nomme l'*autophthalmoscope* (3).

*Effets entoptiques.* — Une disposition assez simple permet d'étudier sur

(1) *Optique physiologique*, page 248.

(2) Zander, *l'Ophthalmoscope*. — Follin, *Leçons sur l'exploration de l'œil*. — Helmholtz, *Optique physiologique*, etc.

(3) Helmholtz, *Optique physiologique*, pages 253, 286.

soi-même, dans certaines circonstances, différents objets contenus dans le cristallin, l'humeur vitrée, etc., c'est-à-dire dans les diverses parties de l'œil situées en avant de la rétine; ces perceptions sont dites *entoptiques* (1). Pour les observer, on approche de l'œil, soit l'image d'une lumière éloignée se formant au foyer d'une petite lentille convergente, soit un petit bouton de métal bien poli qui reçoit la lumière du soleil ou celle d'une lampe, soit un écran de papier foncé ou de carton placé très-près de l'œil, et ne laissant passer la lumière qu'à travers une très-petite ouverture. La disposition la plus convenable consiste à employer une lentille convergente de grande ouverture et de petite distance focale; en avant de cette lentille et à quelque distance on dispose une lumière, ou on reçoit simplement la lumière des nuées; on place alors l'écran opaque percé d'une très-petite ouverture de façon à ce que l'image de la lumière vienne se faire sur cette ouverture qui laisse alors échapper un large cône de rayons divergents. En mettant l'œil très-près de l'ouverture de l'écran, cet œil voit à travers cette ouverture, la surface large et bien éclairée de la lentille sur laquelle se représentent avec une grande netteté les objets entoptiques que l'on veut étudier.

On voit d'abord les bords de l'iris, car le champ lumineux est limité par l'ombre de l'iris; on peut donc observer sur soi-même l'élargissement ou le retrécissement de ce diaphragme ainsi que les entailles, plis ou protubérances de ses bords. On peut distinguer des stries, des places claires dépendant des humeurs (larmes, secrétions des glandes palpébrales) qui recouvrent la cornée. On peut voir aussi des lignes uniformes provenant d'une déformation temporaire de la surface antérieure de la cornée, quand on a frotté ou pressé l'œil par l'intermédiaire de la paupière. Il est possible de reconnaître également par l'ombre qu'elles portent sur la rétine, des taches, des bandes, des lignes radiées que présente le cristallin, lesquelles existent toujours d'une manière plus ou moins marquée et surtout dans certains cas pathologiques. On reconnaît encore des formations mobiles dans le corps vitré et en particulier ce que l'on a nommé des *mouches volantes*. On peut enfin, en disposant convenablement les lentilles et l'écran, distinguer les vaisseaux de la rétine. M. Robert Houdin a indiqué des dispositions d'appareils simples qui permettent d'examiner facilement ces divers effets entoptiques (2).

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 204.

(2) *Comptes-rendus de l'Acad. des sciences*, t. LXII, p. 617, et t. LXIII, p. 865. — Ro-

§ 5. *Lueur oculaire. — Sensibilité de diverses parties de la rétine; punctum cæcum, macula lutea. — Phosphènes.*

*Lueur oculaire.* — Il n'est peut-être personne qui n'ait remarqué que dans certaines conditions d'obscurité les yeux des chiens et surtout des chats brillent d'un éclat remarquable. On a longtemps cru que les yeux de ces animaux brillaient d'une lumière propre et que l'irritation ou d'autres impressions morales pouvaient développer à un degré plus marqué cette faculté. Prévost (1) paraît être le premier qui ait démontré expérimentalement que la condition nécessaire du phénomène était l'admission dans l'œil des animaux, d'une certaine quantité de lumière arrivant de derrière l'observateur. Ce ne peut donc être qu'un phénomène de réflexion, et l'éclat si frappant de cette lueur tient à l'effet du contraste, les animaux étant plongés dans l'obscurité. Il faut remarquer d'ailleurs que les animaux chez lesquels on observe le plus communément ces effets présentent deux circonstances particulières : d'abord une grande dilatabilité de la pupille, ce qui élargit le champ du phénomène, ensuite la présence au fond de l'œil d'une place dépourvue de pigment et recouverte de lamelles minces possédant à un haut degré la propriété de réfléchir la lumière.

L'œil humain peut aussi donner lieu à ces phénomènes, mais seulement dans quelques cas particuliers. Plusieurs observateurs, parmi lesquels MM. Brücke, Behr, etc., avaient observé cette lueur oculaire dans des cas de maladies rares, telles que des tumeurs du fond de l'œil ou d'aniridie. M. Helmholtz a donné le premier la solution complète de cette question, en montrant que l'œil humain normal pouvait donner lieu à l'observation d'une lueur analogue pourvu qu'il fût placé dans des conditions convenables; c'est même à ce propos qu'il imagina l'ophthalmoscope.

Ainsi qu'on l'a expliqué ci-dessus, si un œil est accommodé pour voir un objet lumineux, l'image formée sur la rétine sera elle-même un objet donnant une image qui viendra se superposer à l'objet lumineux lui-même. Notre œil n'étant pas lumineux, nous ne pouvons voir de lumière dans un œil qui regarde le nôtre, mais nous en verrions dans un

bert Houdin, note sur de nouveaux instruments propres à l'observation de divers organes de l'œil. Blois, 1867.

(1) *Bibliothèque Britannique* (1810), tome XLV.

œil fixant un point lumineux à très-peu près en ligne droite avec notre œil, parce que dans ce cas il peut arriver que notre œil intercepte une partie du faisceau de retour émané de l'œil observé. Mais il faut pour cela des conditions particulières qui ne peuvent généralement se produire que par suite d'une disposition spéciale.

Quant à la lumière rougeâtre qui caractérise l'ouverture de la pupille des albinos, elle provient de l'éclairement de la rétine par de la lumière qui a traversé la partie antérieure de la sclérotique de ces sujets dont la choroïde est dépourvue de pigment.

*Punctum cæcum.* — Les fibres qui constituent le nerf optique sont insensibles à l'action directe de la lumière; elles sont transparentes, car l'examen ophthalmoscopique permet de voir au travers de leur substance les vaisseaux artériels et veineux qui en occupent le centre que l'on nomme la papille du nerf optique, comme on l'a vu plus haut, et s'irradient avec lui sur la rétine; on reconnaît cependant que cette partie de l'organe de la vue est complétement insensible à la lumière. Elle forme au fond de l'œil une *tache aveugle* ou *punctum cæcum* dont la découverte est due à Mariotte.

Voici une manière très-simple de constater l'existence de cette région insensible à la lumière : on ferme l'œil gauche et on regarde à la distance de 25 à 30 centimètres la figure 71, en ayant soin de fixer la petite croix

Fig. 71.

et en plaçant l'œil droit à peu près perpendiculairement au-dessus de la croix; en variant un peu dans un sens ou dans l'autre, à droite ou à gauche, ou en avant ou en arrière, la position du livre, on en trouve une pour laquelle l'image du cercle blanc disparaît complétement; en deçà et au delà elle apparaît de nouveau. Il est bien entendu que pour que l'expérience réussisse, il faut avoir soin de ne pas cesser un seul instant

de fixer la petite croix; cette condition est nécessaire pour orienter l'œil d'une manière convenable, car on va voir que la région de la vision spécialement distincte correspond à une partie très-restreinte de la rétine.

Pour faire l'expérience avec l'œil gauche, il faudrait employer une figure symétrique de celle-ci.

On peut se rendre compte que dans cette circonstance l'image du cercle blanc vient bien se faire sur l'entrée du nerf optique : M. Donders a montré directement, au moyen de l'ophthalmoscope, l'insensibilité de cette région en y faisant tomber l'image d'une flamme qui ne produisait dans ce cas aucune sensation lumineuse chez le sujet soumis à l'expérience; il a pu donner ainsi la démonstration la plus directe que la tache aveugle correspondait bien à l'insertion du nerf optique lui-même et non pas seulement à celle des gros vaisseaux qui s'y trouvent. Enfin M. Coccius a montré qu'on pouvait faire cette même expérience sur soi-même.

Le diamètre moyen du *punctum cœcum* est d'environ $1^{mm},8$; son diamètre apparent horizontal est d'environ 6° en moyenne; mais d'un sujet à un autre il peut présenter des variations du simple au triple.

On peut se rendre compte de l'importance de la tache aveugle dans le champ visuel, en remarquant, comme le fait M. Helmholtz, que 11 pleines lunes pourraient s'y ranger à la file, et qu'à la distance de 2 mètres environ une figure humaine y peut disparaître.

On peut se demander comment il se fait que nous ne soyons pas gênés à chaque instant par la présence de cette tache aveugle? mais cette question est évidemment du domaine de la physiologie; on peut dire cependant que les conditions ordinaires de la vision étant l'emploi des deux yeux, les indications fournies par un de ces organes complètent celles de l'autre, et aussi que la véritable manière que nous employons pour prendre connaissance des objets qui se trouvent dans le champ visuel est de déplacer rapidement l'axe de fixation ou de maximum de netteté dans la vision, lequel correspond à la partie de la rétine à laquelle on donne le nom de *tache jaune* et dont il va être question.

*Macula lutea* ou *tache jaune*. — Dans la description de l'œil faite antérieurement page 302, fig. 61, on a déjà fait remarquer que très-près de l'insertion du nerf optique dans la rétine, et à peu près symétriquement par rapport à l'axe de figure de l'œil entre les lignes L et K, se trouvait une sorte de tache remarquable par sa coloration jaune; on ne l'a

jusqu'à présent observée que dans l'œil de l'homme et des singes.

Au centre de la tache jaune se trouve une petite dépression beaucoup plus transparente que les parties environnantes, qu'on appelle la *fovea centralis*. La tache jaune est composée d'une couche de fibres particulières qui rayonnent du centre de la *fovea centralis*.

Des mesures prises par différents observateurs donnent :

Diamètre horizontal de la tache jaune. $2^{mm},25$ à $3^{mm},24$
— vertical. . . . . $0^{mm},81$
Diamètre de la *fovea centralis* . . . . $0^{mm},18$ à $0^{mm},22$.

La tache jaune est le lieu de la vision distincte ; fixer un objet de manière à en percevoir les détails, c'est diriger l'œil de façon que l'image de cet objet vienne se faire sur la tache jaune.

Lorsqu'au contraire l'image d'un objet tombe sur les parties latérales de la rétine, elle donne une sensation d'autant moins nettement définie qu'on s'éloigne davantage de la région de la *macula lutea*. C'est ce qu'on appelle la *vision indistincte*.

*Phosphènes*. — La rétine, au lieu d'être impressionnée par les vibrations lumineuses, peut être excitée mécaniquement, et il en résulte une sensation de lumière qui ne correspond à aucun éclairage objectif du champ visuel ; ainsi un coup subit donné sur l'œil produit une lueur répandue dans tout le champ de la vision, elle est souvent assez intense et passe comme un éclair. Au lieu d'un choc violent, si l'on vient à presser le globe de l'œil en un point voisin de l'orbite, il se produit une impression de lumière correspondant à la partie de la rétine qui a été comprimée. Tout autre mode d'excitation nerveuse, comme l'électricité, peut conduire à des résultats analogues. Ces sensations lumineuses dues à des causes différentes de l'excitation lumineuse, ces *phosphènes* comme on les appelle, sont très-variées et ont été étudiées par plusieurs physiologistes ; elles ont pu guider dans l'étude de certaines affections de l'œil.

On doit également rapporter à des effets de cette nature la lumière propre de la rétine, lumière blanchâtre, admise par les physiologistes et qui ne dépend d'aucune cause objective ; elle provient d'une excitation nerveuse interne, peut-être du mouvement du sang dans les vaisseaux qui tapissent cette partie de l'organe.

# CHAPITRE II.

## De la sensation lumineuse.

### § 1. *Variation de l'intensité de la sensation avec celle de l'intensité lumineuse.*

On doit distinguer dans les sensations leur *qualité* et leur *intensité*. Il ne saurait y avoir de commune mesure entre des quantités qui ne sont pas de même espèce, et on ne peut songer à comparer les intensités de deux lumières qu'autant qu'elles sont de même qualité, c'est-à-dire de même couleur.

La couleur d'une lumière simple est déterminée par sa longueur d'onde, c'est-à-dire par son nombre de vibrations pendant l'unité de temps, comme la hauteur d'un son est déterminée par le nombre des vibrations sonores. L'oreille peut reconnaître, après un exercice plus ou moins long, il est vrai, si deux sons simultanés ont la même hauteur; elle reconnaît beaucoup plus facilement le contraire si les deux sons se succèdent à un court intervalle. L'œil au contraire perçoit du premier coup des différences, même très-faibles, dans la coloration de deux champs éclairés juxtaposés; mais si les impressions sont séparées par un intervalle de temps si faible qu'il soit, ses jugements n'ont plus la même sûreté. Ainsi l'organe de l'ouïe peut acquérir par l'exercice assez de sensibilité pour reconnaître où l'on doit placer un son dans l'échelle musicale, mais l'œil classe difficilement une couleur isolée.

L'oreille ne peut guère juger de l'égalité d'intensité de deux sons simultanés de même hauteur; elle le peut s'ils se succèdent. L'œil au contraire ne peut comparer que des intensités coexistantes ou séparées par un très-faible intervalle de temps; l'évaluation isolée de l'intensité lui est impossible comme à l'oreille. Nous avons donc surtout la mémoire des sensations successives de l'oreille et celle des sensations simultanées de l'œil.

Il est probable que l'oreille n'intervient pas seule dans les jugements qui la concernent; à côté de cet organe il y en a un autre, le larynx, destiné à produire les sons et qui est sous l'empire de la volonté; aussi a-t-on remarqué que les personnes exercées à juger la hauteur d'une note de musique isolée opèrent en se la chantant intérieurement, de ma-

nière à la comparer avec d'autres notes qu'ils sont habitués à produire. Pour l'œil, qui paraît juger isolément des couleurs, il ne fait que de les comparer entre elles ou à la lumière dite *blanche*.

Dans la comparaison des hauteurs des sensations lumineuses, l'œil paraît l'emporter en sensibilité sur l'oreille quand cet organe compare des sons à des hauteurs diverses; car l'œil perçoit des différences de nuances correspondant à des rapports de nombres de vibrations qui échapperaient à l'oreille dans la comparaison des intervalles musicaux. Mais il faut remarquer que l'étendue des sons perceptibles comprend un grand nombre d'octaves, tandis que les longueurs d'onde des rayons qui impressionnent la rétine forment à peine une octave (1).

Quand on examine ce qui arrive dans la comparaison des intensités lumineuses, on reconnaît qu'étant donnés deux objets lumineux d'intensités différentes, si les instants de l'observation sont séparés par un intervalle de temps sensible, on ne peut que constater qu'il existe une inégalité, encore faut-il que celle-ci soit considérable. Cela ne doit pas surprendre d'ailleurs si on songe qu'il paraît y avoir pour chaque individu une valeur moyenne de l'intensité lumineuse pour laquelle l'organe visuel est particulièrement à l'aise; la contraction et la dilatation de la pupille ont précisément pour but de faire varier la quantité de lumière qui pénètre jusqu'à la rétine; il y a donc là dans la question des appréciations de l'intensité, résultant d'observations successives, un élément variable dépendant de mouvements involontaires.

Si ce que l'on vient de dire est vrai pour l'observation successive de champs visuels éclairés sur de très-grandes étendues, cela l'est encore plus pour celle de surfaces lumineuses très-restreintes, telles que les flammes, et dans ce cas le diamètre apparent des objets lumineux joue un rôle très important.

Dans la comparaison immédiate, au contraire, l'organe est nécessairement dans le même état; aussi peut-on distinguer facilement lorsque deux éclairements diffèrent de l'égalité, mais toujours sans qu'il soit possible d'assigner une valeur quelconque, même approchée, au rapport qui peut exister entre eux. Aussi, comme nous l'avons vu tome Ier, page 97, les plus anciennes méthodes photométriques sont-elles fondées sur la nécessité de ramener à l'égalité de sensation, par des modifications préliminaires appréciables, les effets de deux sources lumineuses sur la rétine.

(1) Voir tome Ier, page 147.

Soient 1 et $1 + \alpha$ les intensités de deux éclairements au moment où ils frappent la rétine, $\alpha$ peut encore conserver une certaine valeur lorsque l'œil se refuse à apprécier aucune différence entre ces intensités. L'expérience a montré que dans certaines limites cette quantité $\alpha$, variable avec l'observateur, change peu avec la valeur absolue de l'éclairement pris pour unité, pourvu toutefois que les circonstances soient telles que l'œil fonctionne sans éprouver de fatigue soit par défaut d'intensité, soit au contraire par excès. Cette quantité $\alpha$ change avec les circonstances, elle varie de $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{150}$ ; ce dernier chiffre ne peut être atteint que dans des conditions exceptionnelles; Bouguer pouvait distinguer $\frac{1}{64}$ de différence entre les intensités de deux lumières.

Dans certaines conditions de mouvement, Arago a trouvé que ce chiffre descendait à $\frac{1}{131}$. On peut voir ce qui a déjà été dit sur ce sujet, t. Ier, pages 99 et 173.

M. Fechner (1) a proposé, sous le nom de *loi psychophysique*, une relation entre l'intensité de la lumière et l'énergie de la sensation qu'elle produit, loi qui s'appliquerait aussi à des sensations d'un autre ordre. Cette loi est celle-ci : en appelant S et s les sensations produites par des intensités lumineuses H et h on aurait

$$S - s = \log \frac{H}{h}$$

au moins tant que les causes de perturbation ne sont pas prédominantes.

Les principes qui servent de point de départ à l'établissement de cette relation ne sont pas absolus; voici comment on pourrait exposer les raisonnements qui y conduisent : les agents extérieurs (ici c'est la lumière) produisent des sensations, c'est-à-dire des effets sur les sens, puis le cerveau en communique la perception à notre être intelligent; si on admet que la perception soit proportionnelle à la sensation et qu'en outre les différences de sensations qui cessent d'être perçues soient toujours du même degré de petitesse, en traduisant en langage algébrique ce fait que les plus petites différences perceptibles de la

(1) Voir Helmholtz, *Optique physiologique*, page 414.

sensation sont des fractions constantes ou à peu près de l'intensité, on a

$$dS = A \frac{dH}{H},$$

A étant une constante; cette relation intégrée conduit à l'expression ci-dessus indiquée.

Le fait expérimental c'est que $\frac{dH}{H}$, que l'on avait appelé plus haut $\alpha$, est constant pour un même individu dans les mêmes circonstances, et l'hypothèse est que dS, différence de sensation qui cesse d'être perceptible, est constante.

Cette relation, qui suivant divers auteurs allemands s'appliquerait à d'autres sensations, telles que celle des sons, des efforts musculaires, etc., s'accorde assez bien avec le classement empirique des étoiles en divers ordres de grandeurs, les numéros des grandeurs s'accroissant sensiblement de quantités proportionnelles au logarithme de leur éclat photométrique.

Une semblable loi offrirait beaucoup d'intérêt au point de vue physique si on savait faire la part de la sensation, c'est-à-dire de l'effet immédiat sur le sens, et de la perception; malheureusement la science est encore loin de pouvoir le faire. D'ailleurs, l'effet de la constance approximative de la sensibilité relative peut s'expliquer simplement par l'effet de causes perturbatrices; il pourrait bien arriver en effet que la différence des sensations simultanées produites par deux intensités lumineuses différentes ne soit pas égale à la différence de ces sensations si on pouvait les évaluer successivement et isolément, et la loi de Fechner s'applique précisément aux sensations isolées. Pourrait-on dire, par exemple, que si une balance chargée de 100 gr. dans un plateau et de 100 gr. plus 1 milligramme dans un autre trébuche d'un angle de 1°, cet angle de 1° serait la différence des angles dont elle trébucherait si on mettait successivement dans le même plateau 100 gr. ou 100 gr. plus 1 milligramme sans rien mettre dans l'autre?

### § 2. *Composition des couleurs; couleurs complémentaires.*

*Effet produit sur l'œil par les lumières de différentes couleurs.* — Après avoir montré quelle est l'influence de l'intensité de la lumière sur l'impression produite sur la rétine, il faut examiner comment cette impression varie quand la couleur de la lumière, c'est-à-dire le nombre

des vibrations relatives aux rayons que l'on considère, vient à changer.

Le nombre de vibrations d'une lumière est en raison inverse de la durée de ces vibrations, et comme dans l'éther du vide toutes les vibrations se propagent avec la même vitesse quelle que soit leur période, le chemin parcouru par une lumière pendant la durée d'une vibration sera proportionnel à cette durée; c'est ce chemin qu'on appelle la *longueur d'onde* de la lumière considérée.

On est dans l'habitude de se servir de cette quantité pour caractériser les différentes espèces de lumière. Dans les corps les choses ne se passent pas comme dans le vide, et les lumières de périodes différentes s'y propagent avec des vitesses inégales; la vitesse que possédaient ces lumières dans le vide se trouve altérée différemment, suivant leur période et suivant la nature du corps traversé.

Un des effets les plus immédiatement appréciables quand la lumière pénètre dans les corps est la *dispersion*, ou si l'on veut la séparation des lumières de chaque période dans différentes directions ainsi qu'on l'observe lorsqu'un faisceau composé vient à traverser des milieux dont les faces ne sont pas parallèles; mais comme cette dispersion varie avec la nature des corps, c'est-à-dire comme la réfrangibilité d'une lumière de période donnée varie avec la nature du corps réfringent, on voit que la seule manière de définir rigoureusement une lumière donnée est d'indiquer sa période de vibration ou mieux sa longueur d'onde dans le vide. On a donné dans le tome I^er^, page 147, un tableau contenant les longueurs d'onde de quelques rayons définis par leur couleur ainsi que par leur voisinage avec plusieurs des principales raies du spectre solaire.

Ce n'est que dans des circonstances extrêmement rares, le plus souvent préparées à dessein, que l'œil perçoit de la lumière simple, c'est-à-dire dont tous les rayons aient même longueur d'onde. Il est aussi très-rare qu'il reçoive toutes les lumières exactement dans les mêmes proportions où elles se trouvent dans la lumière solaire. Les corps dont la lumière se trouve satisfaire ou à peu près à cette dernière condition, sont dits *blancs*.

Les lumières simples ou composées font éprouver une infinité de sensations diverses suivant la proportion plus ou moins grande de chacune d'elles dans le mélange. Une très-petite différence entre deux sensations s'exprime en disant qu'il existe une *nuance* entre les couleurs des corps qui procurent ces sensations. Lorsque la différence entre

les sensations dépasse une certaine limite de grandeur, on dit que les couleurs sont différentes. Le langage ordinaire a classé les différentes sensations de coloration en les rapportant à celles fournies par des objets s'offrant fréquemment à la vue, par exemple le bleu du ciel, le vert des feuilles, etc. Mais ces types sont extrêmement variables, de telle sorte qu'un nom de couleur ne peut rappeler que d'une manière très-vague la sensation que ferait éprouver un objet de la coloration désignée, d'autant plus que l'appréciation des couleurs, au point de vue des nuances, est surtout un résultat de comparaison immédiate et simultanée, résultat dépendant du degré d'éducation de l'observateur, et ainsi que de son état physiologique.

Le vocabulaire des couleurs employées dans les arts, et surtout par les teinturiers, est excessivement varié et étendu; il dépend des pays, des ressources de l'industrie et aussi de la mode; celui des peintres est déjà moindre, parce que le nombre des substances colorées qu'ils mettent en œuvre est beaucoup plus restreint; celui du langage ordinaire l'est encore davantage. Il en faut conclure que nos sensations, tout en présentant un degré infini de variétés, peuvent néanmoins se comparer à un petit nombre de sensations considérées comme types, pouvant se composer entre elles; c'est du moins ce qu'indiquent les noms composés qu'on donne aux couleurs des corps, tels que ceux de jaune-vert, vert-jaune, bleu-vert, bleu-violet, etc.

Il faut remarquer à ce sujet que ces associations de mots ne se font jamais qu'entre les noms de certaines couleurs et jamais entre ceux d'autres couleurs; on ne dira jamais vert-rouge ou rouge-vert, ni bleu-jaune ou jaune-bleu. La seule conclusion qu'on puisse inférer de là relativement aux sensations c'est que, au moins dans l'état normal, il en est qui sont tellement éloignées que l'on ne peut leur trouver aucune analogie entre elles. Étant donnée un feuille d'arbre, on appréciera du premier coup qu'elle est verte, mais un examen plus attentif, et surtout quelque comparaison avec un type dénommé, fera décider si elle est d'un vert-jaune ou d'un vert-bleu; si elle est vert-jaune, on aurait pu la dire tout d'abord jaune-vert, mais on ne l'aurait jamais dite jaune-orangé.

Ce qu'il y a de certain, c'est que l'état de simplicité ou de composition d'une sensation colorée ne peut pas être déterminé à priori; ce n'est que par des expériences spéciales que l'on peut décider si telle ou telle lumière est simple ou bien plus ou moins composée.

Si l'on prenait des échantillons d'une très-grande quantité d'objets

colorés tels que la nature les fournit, et si l'on cherchait à les disposer les uns à côté des autres, de façon à ce qu'on puisse passer de l'un à l'autre par des degrés insensibles, on serait amené (en supposant l'œil dans les conditions normales) à les disposer ainsi :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B. | blanc | blanc | blanc | blanc | blanc | B |
| M. | rouges | jaunes | verts | bleus | violets | M |
| N. | noir | noir | noir | noir | noir | N |

c'est-à-dire de manière à trouver dans des lignes horizontales, par exemple, des couleurs marchant du rouge au violet, et à aller dans les lignes verticales du *noir* au *blanc* en restant dans la même teinte. C'est cette classification expérimentale que M. Chevreul a réalisée ; on y reviendra plus loin dans un paragraphe spécial ; on indique seulement ici un fait d'expérience permettant de tirer certaines inductions pour la théorie des couleurs.

D'abord on peut aller du blanc au noir dans une même teinte. La sensation du blanc est bien réelle, mais celle du noir ne l'est pas; pour que l'on porte un jugement concluant à l'existence de noir, il faut réunir l'idée de la présence d'un corps dans une certaine direction à la constatation d'un manque de lumière (absolu ou relatif) dans cette direction. Le noir n'est donc pas, une sensation ou une couleur, mais une perception; il n'est pas susceptible de plus ou de moins, et l'on ne peut passer du blanc au noir que par une dégradation du blanc, ou si l'on veut par une intensité de sensation blanche décroissant d'une certaine valeur jusqu'à zéro.

Ainsi, en supposant que l'on veuille réaliser le tableau précédent, il faudrait dégrader de la lumière blanche suivant des lignes parallèles depuis BB où elle aurait une certaine intensité (celle des objets blancs les plus fortement colorés qu'offre la nature, un papier blanc éclairé normalement par les rayons solaires, etc.), jusqu'à NN où cette intensité serait nulle. Cela fait on dégraderait, par exemple, chaque teinte suivant une même ligne verticale en partant d'une unité arbitraire d'intensité colorée appliquée sur la ligne BB qui diminuerait en suivant la même loi que la lumière blanche pour devenir nulle à la rencontre de la ligne NN.

L'optique physique a appris quelles sont les couleurs qui résultent

du mélange des rayons de lumières simples ou composées. En ce qui concerne les lumières simples M. Helmholtz, qui s'est occupé d'une manière spéciale de l'étude de leurs mélanges, admet une combinaison donnant une couleur qui ne se retrouverait pas dans les mélanges de blanc et de couleurs simples, ce serait *le pourpre* obtenu par les mélanges de violet et de rouge; il est vrai de dire que les mélanges de blanc et d'autres couleurs n'ont pas été étudiés dans toute l'échelle chromatique, que les expériences sont toujours fort délicates et que leur résultat est toujours entaché de l'idiosympathie de l'observateur. Quoi qu'il en soit, M. Helmholtz a formulé le principe que voici : « La sensation colorée produite par une certaine quantité de lumière mélangée quelconque peut toujours être reproduite par le mélange d'une certaine quantité A de lumière blanche avec une certaine quantité B de lumière saturée (couleur du spectre ou pourpre) d'un ton déterminé. »

Newton est le premier qui ait cherché à composer les couleurs résultant, non-seulement des rayons du spectre, mais encore du mélange de liquides ou de poudres colorées (1). On sait que sa méthode empirique pour le mélange des rayons lumineux du spectre, consistait à diviser la circonférence d'un cercle en 7 arcs proportionnels aux intervalles des sons contenus dans une octave, c'est-à-dire aux nombres suivants :

$$\frac{1}{9}, \frac{1}{16}, \frac{1}{10}, \frac{1}{9}, \frac{1}{16}, \frac{1}{16}, \frac{1}{9}.$$

Le 1er intervalle représentait le rouge, le 2e l'orangé, etc., et le 7e le violet. Si l'on suppose que les secteurs du cercle ainsi divisé représentent les couleurs simples, en cherchant les centres de gravité des arcs et en appliquant à chaque centre de gravité un poids proportionnel à la quantité de lumière que l'on produit de chaque nuance, la couleur de la nuance résultant du mélange se trouve représentée par celle du secteur dans lequel tombe le centre de gravité où se trouve appliquée la résultante des différents poids.

Cette manière de composer la nuance résultant du mélange de différentes lumières est donc le premier exemple de la représentation sur un cercle, des couleurs passant de l'une à l'autre, le rouge se joignant au violet. Biot s'en est servi avec avantage pour la comparaison des teintes dues aux effets de polarisation circulaire. Cette méthode n'avait

(1) Newton, *Optique*, livre Ier, partie 2, 6e proposition.

été appuyée que sur des comparaisons qualitatives et non quantitatives (1) ; dans ces dernières années des résultats plus précis ont été obtenus d'abord par M. Maxwell (2) en perfectionnant la méthode de M. Plateau qui consiste à placer des substances colorées sur un disque tournant, et surtout par M. Helmholtz, qui s'est appliqué à n'employer que des lumières spectrales (3).

Il est souvent commode de pouvoir mélanger la lumière chromatique des objets naturels, par exemple le bleu du ciel, avec celle de corps connus pour en apprécier exactement la teinte : la disposition représentée fig. 72, et qui est due à M. Helmholtz, est des plus simples : elle consiste à placer sur une table en *b* et *c* les deux objets dont on veut superposer les couleurs et à les regarder, l'un au travers d'une glace non étamée à faces parallèles *a*, l'autre *c* par réflexion sur la face antérieure de cette glace. On peut aussi mélanger par ce procédé des lumières provenant de sources quelconques ; il suffit alors de percer la table aux endroits *b* et *c* et de diriger par ces ouvertures les lumières sur lesquelles on veut opérer.

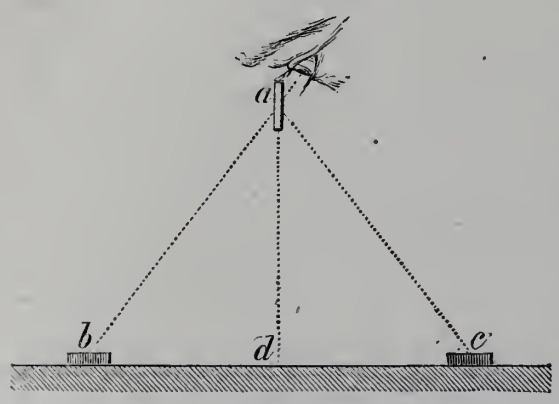


Fig. 72.

*Couleurs complémentaires.* — Un des exemples les plus frappants de la composition des couleurs est celui des couleurs complémentaires, c'est-à-dire des couleurs simples dont la réunion peut donner la sensation du blanc. Cette propriété des couleurs spectrales prises deux à deux fut découverte par Newton ; parmi les diverses méthodes qu'il a indiquées, la plus imparfaite était celle qui consiste à mélanger des poudres et des liquides colorés, et c'est elle que plusieurs observateurs ont employée, ce qui rend leurs résultats souvent contradictoires.

Étant données deux couleurs simples complémentaires, pour qu'on puisse par leur réunion former du blanc, il faut que leurs intensités soient dans un certain rapport qui n'est pas celui de l'intensité de ces mêmes

(1) Biot, *Traité de physique* et *Mémoires sur la polarisation chromatique.*

(2) On the theory on color.... Edimb., *Transact.*, t. XXI, p. 275, 1855. — *Athenæum*, 1856. — *Edimb. journal*, t. II. — *Report of Bristish ass.*, 1856-1860.

(3) Voir pour le détail des appareils : Helmholtz, *Optique physiologique*, page 402 et suivantes.

couleurs dans le spectre solaire ; d'ailleurs, ainsi qu'on l'a déjà dit antérieurement, on ne connaît pas de procédé pour comparer les intensités des couleurs différentes.

M. Helmholtz a dressé un tableau des longueurs d'onde d'une série de couleurs complémentaires prises deux à deux ; il a trouvé ainsi, les longueurs d'onde étant exprimées en millionièmes de pouce de Paris :

| Couleurs. | Longueur d'onde. | Couleurs complémentaires. | Longueur d'onde. | Rapport des longueurs d'onde. |
|---|---|---|---|---|
| Rouge. | 2425 | Bleu verdâtre. | 1818 | 1,334 |
| Orangé. | 2244 | Bleu. | 1809 | 1,240 |
| Jaune d'or. | 2162 | Bleu. | 1793 | 1,206 |
| Jaune d'or. | 2120 | Bleu. | 1781 | 1,190 |
| Jaune. | 2095 | Bleu indigo. | 1716 | 1,221 |
| Jaune. | 2085 | Bleu indigo. | 1706 | 1,222 |
| Jaune verdâtre. | 2082 | Violet. | 1600 | 1,301 |

Comme on le voit, il n'y a aucun rapport déterminé entre les longueurs d'onde de deux couleurs complémentaires, puisque ce rapport varie entre celui de la quarte (1,333) et celui de la tierce mineure (1,20).

D'après le même auteur le vert proprement dit n'aurait pas de couleur simple complémentaire; pour produire du blanc il faudrait ajouter au vert un mélange de violet et de rouge, lequel mélange forme le pourpre.

Contrairement à ce que semblent indiquer les mélanges de matières colorantes, aucun mélange de jaune et de bleu ne peut donner de vert; mais une analyse plus exacte montre que de semblables mélanges, fréquents dans les applications, ne fournissent du vert qu'à la condition d'être formés avec un jaune et un bleu contenant chacun du vert.

Quand au lieu de mélanger deux lumières complémentaires on en mélange d'autres, on doit, avec M. Helmholtz, considérer deux cas :

1° Les deux lumières mélangées sont comprises entre deux lumières complémentaires; dans ce cas, il en résulte une couleur intermédiaire qui tire d'autant plus sur le blanc que l'intervalle entre les couleurs employées est plus considérable, et qui est au contraire d'autant plus saturée que cet intervalle est plus petit.

2° Les deux lumières comprennent entre elles un plus ou moins grand nombre de couples de lumières complémentaires; dans ce cas on obtient du pourpre ou des couleurs intermédiaires entre l'une des

couleurs mélangées et l'extrémité correspondante du spectre; le mélange étant d'autant plus fort en couleur que l'intervalle des couleurs dans le spectre est plus grand, et d'autant plus blanchâtre que cet intervalle est plus petit, tout en restant supérieur à celui de deux couleurs complémentaires.

Une déduction importante de ces expériences faites sur le mélange des couleurs, c'est que les lumières contenues dans le spectre solaire y existent avec des degrés de saturation différents. Ainsi le rouge mêlé avec un vert d'égale intensité donne un orangé rougeâtre, et le violet mêlé à un vert d'égale intensité lumineuse donne un indigo voisin du violet. Le degré de saturation du vert serait donc moindre que celui du rouge ou du violet.

### § 3. *Hypothèses sur le mécanisme de la sensation des couleurs. — Dyschromatopsie.*

L'examen anatomique n'a rien révélé encore sur les moyens de perception des couleurs; on sait seulement que ces perceptions peuvent être altérées d'une manière permanente dans certaines affections naturelles ou passagèrement par l'effet de certaines substances. Des courants électriques, d'après M. Schelske (1), peuvent produire des sensations colorées qui se composent avec des couleurs objectives : un courant ascendant ajoute, un courant descendant retranche une certaine quantité de violet bleuâtre à la nuance des objets observés.

*Dyschromatopsie.* — L'affection des yeux qui diffèrent de l'œil normal au point de vue de la sensation des couleurs porte le nom d'*achromatopsie.* On a parlé d'individus qui étaient entièrement dépourvus de toute idée de couleur et qui ne distinguaient que des lumières plus ou moins intenses; mais le cas le plus fréquent, à des degrés différents, est celui des yeux qui ne voient dans le spectre que deux couleurs qu'ils appellent le bleu et le jaune; c'est la *dyschromatopsie.* On a aussi appelé cette affection le *daltonisme,* du nom du chimiste anglais Dalton qui en était atteint. D'après M. G. Wilson (2), cette affection serait assez fréquente à des degrés modérés; il aurait trouvé un cas sur dix-huit personnes environ. Il est probable, d'ailleurs, que les yeux les plus normaux présentent entre eux des différences notables dans l'appréciation des couleurs; c'est sans doute ainsi qu'il faut expliquer la préférence que les peintres ont sou-

(1) *Archiv. für ophth.,* tomes IX et XI.
(2) *A note on the statistics of colour blindness, in year-book of facts.* — 1858.

vent pour telle ou telle teinte, et qui est quelquefois caractéristique de leurs œuvres.

Le daltonisme porte aussi le nom plus systématique d'*anérythropsie* (difficulté à percevoir le rouge).

Une personne en prenant 55 centigr. de santonate de soude peut éprouver une altération de la vue qui commence au bout de 10 à 15 minutes et dure pendant quelques heures. Elle voit alors en jaune verdâtre les objets éclairés, et en violet les surfaces obscures, sans doute par un effet de contraste, car elle cesse de percevoir l'extrémité violette du spectre.

*Hypothèses sur le mécanisme de la sensation des couleurs.* — Th. Young a cherché à ramener la sensation des couleurs à celle de la superposition de trois excitations inégales. D'après son système, il existerait dans l'œil trois appareils sensoriaux donnant respectivement la sensation du rouge, du vert et du violet. Toute espèce de lumière serait capable d'exciter chacun de ces appareils que nous désignerons sous l'expression plus habituelle de *fibres*, mais avec une intensité qui serait fonction de la longueur d'onde. La sensibilité de chaque système de fibres pour les lumières de différentes longueurs d'onde dans le spectre, serait par exemple représentée, à intensité égale, par les courbes de la figure 73.

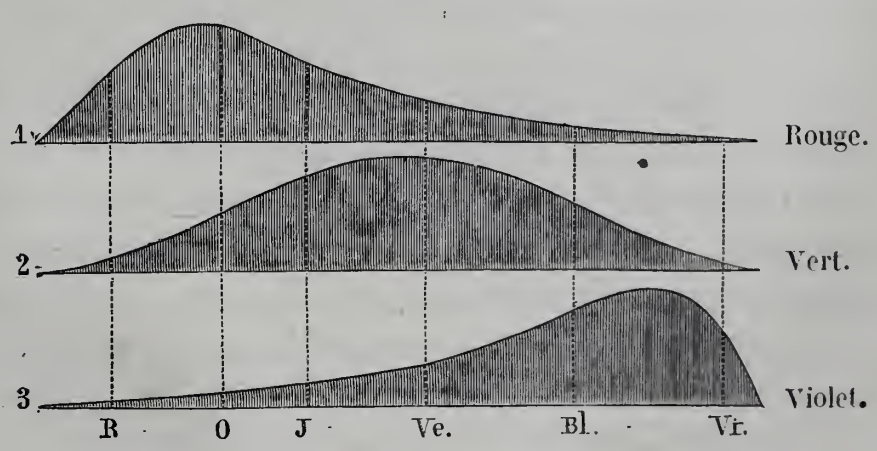



Fig. 73.

La courbe supérieure de R en Vi représenterait l'intensité du rouge dans les différentes parties du spectre solaire; la 2e courbe celle du vert et la 3e celle du violet. On voit alors que pour avoir la sensation produite dans une partie du spectre, dans le jaune par exemple, il faudrait faire la somme des intensités, c'est-à-dire des trois lignes verticales qui entre les courbes et les lignes horizontales correspondent à la lettre J.

Rien, au point de vue anatomique, ne vient appuyer cette opinion; mais d'un autre côté les expériences faites par des yeux normaux sur le mé-

lange des couleurs lui sont favorables. Il en est de même de celles auxquelles on peut soumettre les yeux affectés de dyschromatopsie; c'est ainsi que pour les daltoniens toutes les sensations colorées peuvent se composer au moyen du mélange de deux couleurs fondamentales.

Les sensations primitives de Young n'ont d'ailleurs rien d'absolu, et d'autres observateurs ont pris des couleurs fondamentales plus ou moins différentes : Brewster avait pris le rouge, le jaune et le bleu, et M. Maxwell des couleurs se rapportant aux types rouge, vert et bleu-violet; M. Helmholtz a fait observer que ces trois dernières couleurs permettent de se rapprocher davantage des résultats des observations. Ces différences ne doivent pas surprendre si l'on songe que tous les yeux considérés comme normaux n'apprécient pas exactement de la même manière les mélanges de couleurs.

*Intensité relative des sensations produites par des lumières différemment colorées.* — Il a été question jusqu'ici des différences des couleurs, mais non de leur intensité comparative. On ne peut rien dire de certain sur ce sujet, car les moyens de comparer les intensités de deux couleurs différentes manquent complétement; la grandeur relative de ces sensations peut résulter de deux causes : d'abord de la sensibilité de la rétine pour les différentes couleurs, et ensuite de l'intensité absolue de chaque lumière admise dans l'œil.

La sensibilité pour les différentes couleurs varie d'un individu à un autre, comme on l'a vu plus haut, mais varie-t-elle d'une couleur à l'autre dans le même organe? Pour le reconnaître il faudrait une commune mesure de l'intensité des lumières de différentes couleurs. Théoriquement cette intensité varie proportionnellement à la force vive du mouvement lumineux d'une molécule éthérée pendant l'unité de temps, et si tout ce mouvement pouvait se transformer en chaleur, on pourrait prendre l'action calorifique pour mesure de l'action lumineuse; mais il ne saurait en être ainsi, comme on l'a exposé dans ce volume, livre Ier, page 26, car l'intensité de la chaleur accusée par une pile recouverte de noir de fumée que l'on promène dans le spectre diminue du rouge au violet, est plus forte dans le rouge que dans le jaune où cependant se trouve le maximum d'éclairement.

Mais au moyen des effets chimiques on pourrait peut-être résoudre cette question : si l'on se reporte en effet à ce qui a été dit sur l'actinomètre électro-chimique décrit antérieurement, page 130, on voit là un appareil dans lequel la matière sensible, qui est le sous-chlorure d'argent,

se trouve être impressionnable entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine. Si cette substance donnait un courant électrique dont l'intensité fût proportionnelle à celle des rayons actifs, comme le courant électrique est produit dans les différentes parties du spectre, on aurait ainsi un moyen de comparer entre eux les effets produits par les rayons différemment colorés.

M. Chevreul (1), dans ses recherches sur la comparaison des couleurs, a reconnu que le mélange d'une certaine quantité de lumière blanche avec une couleur du spectre peut changer la teinte de celle-ci. Ainsi le milieu de l'espace G H du spectre solaire qui à une lumière diffuse faible correspondait au 3e bleu violet de la gamme chromatique dont il va être question ci-après, passait au 4e bleu violet quand on éclairait cet espace avec une lumière diffuse plus intense.

D'un autre côté, il a reconnu également que si l'on fait varier l'intensité d'un faisceau lumineux provenant soit d'une certaine partie du spectre solaire, soit de rayons qui ont traversé des écrans de verre coloré, la nuance obtenue change selon l'intensité du faisceau ; ainsi en général les lumières violettes prennent du rouge en se dilatant, et au contraire tournent un peu au bleu en se condensant; la lumière bleue prend du jaune en se dilatant. Une manière très-simple de constater ce changement de nuance consiste à introduire un faisceau lumineux dans une chambre noire, à lui faire traverser un écran en verre coloré, puis une lentille, et à recevoir la moitié de l'image de l'ouverture sur un écran blanc placé à quelque distance du foyer et l'autre moitié à une autre distance ; on évalue aisément de cette manière les rapports des intensités lumineuses d'une même étendue de chaque image.

M. Helmholtz (2) en comparant les intensités des couleurs du spectre d'après différentes méthodes en a conclu que l'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse qui diffère suivant l'espèce de lumière. Ainsi, lors de la combinaison des couleurs, il a trouvé que l'intensité apparente du violet qui donne du blanc avec le jaune vert est $\frac{1}{10}$ de ce jaune pour un éclairage intense, tandis qu'elle n'est que le $\frac{1}{5}$ pour un éclairage plus faible.

Il semble résulter de l'ensemble des faits observés que lorsque la rétine perçoit une impression colorée, en même temps elle reçoit une impression qui correspond à une certaine quantité de lumière

(1) Moyen de nommer et de définir les couleurs. *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 33, p. 77.
(2) *Optique physiologique*, p. 422.

blanche; s'il en est ainsi, la nuance doit paraître varier avec l'intensité de la lumière, et l'on se rendrait compte comment, d'après les expériences de M. Chevreul, quand l'intensité d'une lumière colorée augmente, l'impression sur la rétine devient plus blanche, et d'autant plus que cette intensité est plus considérable.

*Limites de sensibilité de la rétine.*— On a déjà parlé plus haut, page 307, de l'absorption des rayons infra-rouges par les milieux de l'œil, mais il peut encore arriver assez de rayons de cette réfrangibilité sur la rétine pour donner une impression si celle-ci était sensible à leur influence; comme le spectre lumineux se limite au rouge extrême un peu en deçà de la raie A, il faut donc admettre qu'au delà d'une certaine longueur d'onde l'œil ne peut plus percevoir les impressions dues à la transmission du mouvement des molécules éthérées.

Il ne paraît pas en être de même pour les rayons ultra-violets, car on a vu dans le 1er volume, page 141, que ces rayons peuvent devenir visibles quand on les observe dans des spectres parfaitement épurés en se servant de prismes formés de substances, comme le quartz, qui n'absorbent pas ces rayons. M. Helmholtz a reconnu que la lumière ultra-violette reçue sur un écran de bisulfate de quinine doit paraître 1200 fois plus intense que lorsqu'elle est reçue sur une surface mate de porcelaine qui la renvoie à l'œil par simple diffusion; cela prouve que si la rétine est sensible à l'influence de ces rayons très-réfrangibles, son impressionnabilité est bien faible, et qu'elle se trouve rentrer dans les conditions communes à toutes les substances impressionnables étudiées dans cet ouvrage, c'est-à-dire qu'elle est sensible entre certaines limites de réfrangibilité au delà desquelles les vibrations lumineuses n'ont plus d'action; seulement les limites sont difficiles à déterminer, car au delà et en deçà de la position du maximum d'action dans le spectre solaire, l'intensité avec laquelle la rétine est impressionnée va toujours en diminuant.

### § 4. *Classification des couleurs. Gammes chromatiques.*

M. Chevreul (1), pour déterminer d'une manière fixe le classement des nuances que présentent les objets naturels, a établi des types invariables auxquels peuvent être rapportées toutes les couleurs naturelles et artificielles. Il a imaginé, dans ce but, la construction chromatique hémisphérique comprenant, dans leur ensemble, les tons d'une

(1) Contraste simultané. Paris, 1849.— *Mém. de l'Académie des sciences*, t. 33 (1861).

même nuance et les nuances des diverses couleurs, alors que ces tons et que ces nuances passent de l'un à l'autre par certains degrés qui sont suffisamment rapprochés pour qu'une couleur donnée puisse être comprise entre deux nuances types dont elle diffère très-peu.

Les différentes nuances des couleurs que M. Chevreul a nommées *franches* et qui ne sont supposées mélangées ni de teintes sombres ni de blanc, ont été prises au nombre de 72; il les a réparties autour d'une circonférence divisée par 72 rayons correspondant à ces 72 couleurs. Sur trois divisions de la circonférence également espacées entre elles, c'est-à-dire à 120° de distance, il a placé les noms de trois couleurs simples, le rouge, le jaune, puis le bleu. M. Chevreul a pris pour types de ces couleurs les nuances de certaines parties du spectre qui seront indiquées plus loin. Il a intercalé ensuite entre elles, au moyen d'une méthode empirique très-simple qui est indiquée dans ses mémoires, l'orangé, le vert et le violet, de manière que l'orangé partage également l'intervalle compris entre le rouge et le jaune, le vert l'intervalle compris entre le jaune et le bleu, et le violet l'intervalle entre le bleu et le rouge.

Il a intercalé ensuite entre les 6 couleurs précédentes qui sont à 60° de distance sur la circonférence, les six couleurs, rouge orangé, orangé jaune, jaune vert, vert bleu, bleu violet, violet rouge; enfin dans chaque intervalle de ces 12 couleurs il a placé cinq couleurs équidistantes, par exemple entre le rouge et le rouge-orangé :

Le 1er rouge,
Le 2e rouge,
Le 3e rouge,
Le 4e rouge,
Le 5e rouge,

et entre le rouge orangé et l'orangé :

Le 1er rouge orangé,
Le 2e rouge orangé,
Le 3e rouge orangé,
Le 4e rouge orangé,
Le 5e rouge orangé,

et ainsi des autres. On a donc de cette manière, autour de la circonférence, les 72 couleurs qui portent le nom de nuances. La planche co-

loriée annexée ci-contre représente le cercle chromatique des couleurs franches.

Les nuances comprises entre deux couleurs simples sont dites composées, car elles contiennent dans leur constitution les deux couleurs simples en proportions variables avec leur éloignement de l'une ou de l'autre. Ainsi l'orangé placé à distance égale du rouge et du jaune contient un mélange de ces deux couleurs; le vert est un mélange de jaune et de bleu, etc.

On a dit plus haut que le rouge, le jaune et le bleu correspondaient à des parties déterminées du spectre; voici quelles sont les déterminations faites par M. Chevreul en comparant les couleurs du cercle chromatique avec celles d'une spectre solaire formé au moyen d'un prisme en sulfure de carbone et présentant les raies principales :

| Parties du spectre désignées par les raies. | Couleurs du cercle chromatique. |
|---|---|
| Entre A et B | 5 Violet rouge |
| Entre B et C | Rouge. |
| A $\frac{1}{2}$ de la distance C D | 5 Rouge |
| En D | Entre 2 et 5 Orangé |
| A $\frac{1}{8}$ de DE à partir de D | Jaune |
| En E | 4 Jaune vert |
| Entre E et b | Vert |
| Entre F et G, tangent à F | Bleu |
| En G | 1 Bleu-violet |
| Au milieu de GH | 3 Bleu-violet |
| H | Violet? |

Si chaque secteur du cercle chromatique était coloré d'une manière uniforme, on n'aurait que 72 nuances, mais chacune d'elles peut varier quant à l'intensité de sa couleur, c'est-à-dire qu'elle peut être plus ou moins foncée. On peut représenter sur le même cercle chromatique ces changements, en partageant les rayons en 20 longueurs égales et en décrivant à partir du même centre 20 circonférences équidistantes. Si l'on considère une seule couleur, on figurera vers le centre le blanc, et sur un même rayon, à mesure que l'on s'éloignera du centre, cette couleur sera supposée de plus en plus foncée. Ainsi la première petite surface en partant du centre sera blanche; la seconde, comprise entre

# CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M. Chevreul.

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS FRANCHES

le 1er cercle et le second, sera couverte par une très-faible quantité de couleur, de sorte qu'elle aura l'aspect de blanc légèrement teinté; la 3e surface, comprise entre le 2e et le 3e cercle, sera un peu plus foncée mais toujours de même nuance, et ainsi de suite; en suivant les surfaces le long d'un même rayon, on augmentera l'intensité de la couleur et on arrivera à la dernière surface voisine de la circonférence, dont la couleur sera si foncée qu'elle semblera presque noire; enfin à l'extérieur du cercle on suppose l'absence de lumière ou le noir.

L'ensemble de cette dégradation d'une même nuance est appelée *gamme*, et les parties diverses d'une même gamme se nomment des *tons;* ces tons ont été choisis expérimentalement au point de vue optique pour qu'ils soient également espacés ou distincts entre eux. Les mémoires de M. Chevreul cités plus haut renferment l'indication de la méthode suivie pour obtenir ces résultats.

Chacune des 72 nuances du cercle chromatique est degradée en 20 tons, puisque toutes les premières surfaces ayant pour sommet le centre du cercle chromatique sont blanches dans toutes les gammes; le premier ton de chaque gamme ne commence qu'entre le 1er et le 2e cercle. Les tons compris dans chaque gamme entre deux cercles sont dits à la même hauteur. On voit, d'après cela, que les 72 gammes du cercle, dégradés en 20 tons, forment 1440 couleurs d'intensité et de hauteur différentes; on les appelle *couleurs franches*, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas rabattues par du gris qui en domine l'éclat. Mais il est rare que la nature présente des objets colorés ainsi et le cercle chromatique dont il vient d'être question ne serait pas complet s'il ne donnait pas les changements qu'éprouve chacune des couleurs franches, par son mélange avec diverses proportions de gris; c'est alors la partie hémisphérique du cercle qui va donner toutes ces nuances ainsi rabattues.

Supposons que l'on fasse passer un plan perpendiculaire au cercle précédent, et passant par le rayon correspondant, au rouge, par exemple; supposons ensuite que l'on décrive sur ce plan, avec les mêmes rayons que ceux du cercle horizontal, 21 cercles qui correspondent à ceux décrits sur celui-ci et ayant le même centre, et que l'on divise la demi-circonférence du plus grand cercle en 20 parties égales. On remarquera que chaque moitié de ce demi-cercle aura 10 segments; les 10 segments qui comprendront le quart de cercle correspondant à la gamme rouge seront destinés à donner toutes les nuances rabattues de rouge, et les 10 autres donneront les nuances rabattues de la gamme

verte qui se trouve à 180° du rouge sur le cercle chromatique horizontal des gammes franches.

L'ensemble des tons des 10 segments rouges sera formé par la dégradation du blanc à l'absence de lumière ou au noir, en passant par le gris dans les mêmes conditions d'équidistance de ses tons que dans les gammes ordinaires. Ces gammes en s'éloignant du rouge, pour se rapprocher du gris, perdront de la première couleur pour prendre du gris dans la proportion de leur éloignement de la gamme du cercle horizontal des couleurs franches ; la transition est tout à fait semblable à celle dont on a parlé plus haut. Ainsi la première gamme du plan vertical, voisine du rouge, contiendra $\frac{9}{10}$ de rouge et $\frac{1}{10}$ de gris ; la deuxième gamme en s'éloignant du rouge contiendra $\frac{8}{10}$ de rouge et $\frac{2}{10}$ de gris et ainsi de suite. Si l'on fait la même opération pour les 72 grammes franches, on voit que les 36 plans verticaux, passant par le centre commun, contiendront 72 quarts de cercle renfermant toutes les gammes rabattues de chacune des gammes franches, ainsi que la gamme de gris. Toutes les gammes rabattues au même degré, par exemple celle à $\frac{2}{10}$ de gris, peuvent, dans toutes les nuances, être supposées se trouver sur les génératrices d'un cône dont le sommet est au centre commun et ayant la gamme grise comme axe. L'ensemble de ces cônes à même sommet, à même axe et à génératrices égales, formera avec le cercle des couleurs franches le cercle chromatique hémisphérique contenant toutes les nuances et les tons de couleurs naturelles et artificielles.

Le nombre des couleurs et des teintes de cercle est facile à estimer : puisque le cercle chromatique des couleurs franches est formé de 20 fois 72 nuances, et qu'il y a 10 fois autant de couleurs rabattues, cela fait 14400 tons, comprenant toutes les nuances et tous les tons depuis le blanc jusqu'au noir.

Au lieu de représenter de cette manière les différentes nuances rabattues, on forme sur des plans des cercles chromatiques semblables à celui qui représente les gammes des couleurs franches plus ou moins foncées ; on a le cercle comprenant les couleurs rabattues à $\frac{1}{10}$ de gris, le cercle à $\frac{2}{10}$, etc., et chaque cercle contenant 1440 nuances, les 10 cercles plans donnent les 14400 nuances destinées à la comparaison des couleurs naturelles.

Ces déterminations des couleurs et des nuances normales ont été faites avec le plus grand soin par M. Chevreul, d'abord avec des écheveaux de laine teints, puis ensuite dans certains cas avec des émaux

vitrifiés, et reproduites également sur papier. Il y aurait un très-grand intérêt à ce qu'elles fussent toutes reproduites par des émaux. On peut toujours, en suivant la méthode simple qu'il a décrite avec soin, retrouver les différentes nuances dont il s'agit et refaire à nouveau ce cercle, car M. Chevreul a eu soin de comparer aux différentes nuances et tons de son cercle chromatique non-seulement les couleurs du spectre solaire qui servent de type comme on l'a vu plus haut, mais encore les couleurs des principales fleurs et des principaux fruits.

On peut exprimer aisément par une formule la couleur et le ton d'une nuance quelconque. On cherche d'abord dans le cercle des couleurs franches à quelle gamme la couleur peut appartenir ; une fois la gamme trouvée, on cherche le ton de l'échantillon. Par exemple 2 R O 7 exprime 2e gamme du rouge orangé, 7e ton; 4 V B 6, exprime la 4e gamme du vert bleu, 6e ton.

Si maintenant, ce qui arrive habituellement, la couleur n'a ni la pureté ni l'éclat des couleurs franches, on cherche sa nuance correspondante dans les cercles chromatiques des couleurs rabattues. La première observation n'en est pas moins utile; mais quand elle est faite on cherche la nuance semblable à celle que l'on étudie dans les cercles des couleurs rabattues et la formule se complète : si l'on trouve par exemple que pour la 1re nuance ci-dessus il y a $\frac{4}{10}$ de gris, on écrira 2 R O 7 $\frac{4}{10}$, ce qui signifie deuxième gamme du rouge orangé septième ton, rabattu à $\frac{4}{10}$ de gris; dans le même cercle rabattu, la deuxième formule deviendrait 4 V B 6 $\frac{4}{10}$.

On suppose que l'intensité des lumières diverses est la même, mais en réalité, quand on veut comparer des couleurs inégalement éclairées, M. Chevreul a reconnu que la nuance pouvait changer un peu avec cette intensité comme on l'a dit précédemment page 339 ; ainsi une couleur violette très-vive se comporte comme donnant une sensation un peu plus bleue. Ces changements sont du reste compris entre de très-faibles limites.

Ce mode de classification des couleurs peut rendre des services aux arts et à l'industrie en donnant des types invariables puisqu'ils sont basés sur les couleurs simples des rayons différemment réfrangibles de la lumière solaire.

# CHAPITRE III.

## Phénomènes accessoires, simultanés ou consécutifs à la sensation lumineuse.

### § 1. *Irradiation.*

On comprend sous le nom d'irradiation une série de faits qui peuvent se résumer de la manière suivante : un champ limité, beaucoup plus vivement éclairé que le fond sur lequel il se projette, paraît plus grand qu'il ne l'est réellement; et réciproquement un champ obscur sur un fond vivement éclairé paraît plus petit qu'il ne l'est réellement. C'est ainsi que des fentes étroites très-vivement éclairées paraissent beaucoup plus larges qu'elles ne le sont : on peut faire facilement l'expérience avec la fente variable d'un porte-lumière adapté au volet de la chambre noire.

Les anciens avaient déjà remarqué ces faits; M. Plateau, dans ses recherches sur l'irradiation, cite le commencement de la troisième satire de Perse :

« Déjà la clarté du matin se fraye un passage par les fenêtres et la « lumière élargit les fentes étroites (1). »

Il ne faudrait cependant pas confondre complétement les illusions relatives aux fentes étroites avec celles que produisent des surfaces éclairées normalement; dans le cas des fentes, il y a nécessairement, d'une part, des effets de diffraction, de l'autre, une diffusion plus ou moins notable de la lumière sur les parois de la fente, circonstances qui ont pour effet de la faire paraître plus grande qu'elle ne l'est en réalité.

Les mêmes observations peuvent s'appliquer, en partie au moins, aux expériences dans lesquelles on cache avec le bord d'un écran une partie d'un corps lumineux qui paraît alors déborder sur l'écran.

La véritable manière d'expérimenter sur l'irradiation consiste à ob-

(1) . . . . . Jam clarum mane fenestras
Intrat et angustas extendit lumine rimas.

server des figures noires sur fond blanc, ou blanches sur fond noir, et à éclairer vivement le tout; M. Plateau opérait aussi en découpant des figures dans du carton noir et les projetant sur la lumière des nuées en les plaçant à plusieurs mètres de distance.

Dans ces conditions, deux carrés ou deux cercles de mêmes dimensions, comme le représente la fig. 74, l'un blanc sur fond noir, l'autre noir

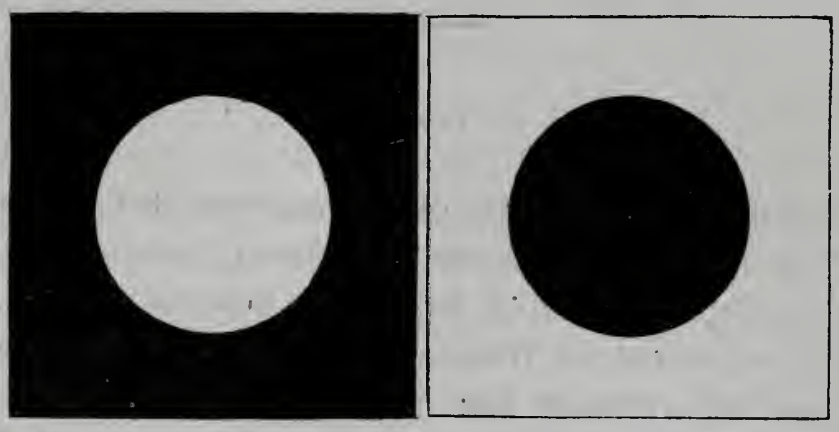


Fig. 74.

sur fond blanc, semblent inégaux, le blanc paraissant plus grand que le noir. Pour voir nettement l'effet il faut placer cette figure devant soi à la distance de la vision distincte, et même plus loin.

Il en est encore de même lorsqu'on juxtapose, suivant un diamètre, un demi-cercle blanc sur fond noir et un demi-cercle noir sur fond blanc et que les rayons sont les mêmes; la fig. 75 représente cet effet. C'est ainsi que lorsque la lune est nouvelle, le croissant paraît appartenir à un cercle d'un diamètre plus grand que celui du reste du disque faiblement illuminé de la lumière cendrée.

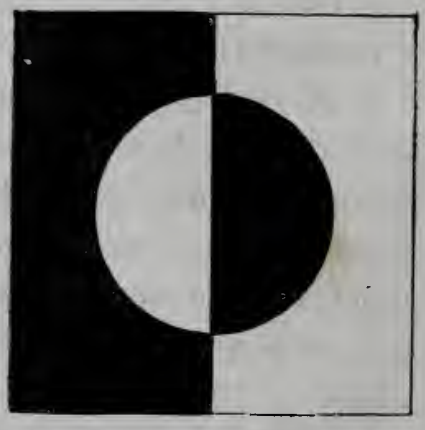


Fig. 75.

On pourrait citer beaucoup d'expériences relatives à ce sujet; ainsi des images lumineuses très-voisines se confondent. On a même remarqué, en faisant des observations analogues aux précédentes avec des figures rectangulaires au lieu de figures rondes, que des personnes jugeaient que l'extension des images dans les deux directions correspondantes aux côtés des rectangles était inégale.

M. Plateau (1) a beaucoup varié les expériences sur ce sujet, et on n'a

(1) *Mém. de l'Acad. de Bruxelles*, t. 11.

cité ici que les plus simples, c'est-à-dire celles où il ne semble pas possible de faire intervenir d'autres éléments que l'intensité de la lumière incidente. L'explication qu'il a donnée de ce phénomène, et qui a été défendue par un certain nombre de physiciens, consiste à admettre une propagation de l'excitation par la lumière, d'un élément de la rétine à un autre. M. Helmholtz (1) n'admet pas cette explication, car, dit-il, lors de l'excitation de filets nerveux dans certaines parties du corps, la sensation se trouve bien limitée aux points excités et il doit en être de même pour la rétine; il pense au contraire que la plupart de ces phénomènes sont dus à des effets d'accommodation inexacte et tiennent à des images de diffusion, c'est-à-dire à ce que, par défaut d'accommodation, les images lumineuses empiétent un peu en dehors des contours qu'elles devraient occuper à la distance de la vision distincte.

La question est difficile à résoudre, et quant à présent il ne paraît pas que l'on puisse supposer à priori que ces phénomènes soient dus seulement à un défaut d'accommodation. Il pourrait se faire que la diffusion eût lieu sur la rétine même autour des points éclairés, et alors les parties voisines pourraient être excitées par cette lumière diffusée; le même effet arrive quand on projette une image lumineuse sur une surface phosphorescente, ainsi qu'on l'a vu tome Ier, page 404.

Sans s'étendre plus longuement sur ce sujet, on peut dire que l'irradiation comprend un très-grand nombre de faits dépendant en partie des illusions du jugement, soit dans l'estimation des grandeurs, soit dans l'appréciation de la forme des lignes, et il est difficile de déterminer autrement que par des expériences directes la part des actions purement physiques et celle des opérations physiologiques qui constituent la perception des sensations.

### § 2. *Persistance de la sensation lumineuse; sa durée. Thaumatrope; Phénakisticope.*

L'ébranlement nerveux qui constitue la sensation lumineuse met un certain temps à s'établir; on ne connaît pas ce temps, mais l'ensemble des phénomènes connus montre qu'il doit être très-court, car jusqu'ici on n'a pas trouvé qu'il y ait eu lieu d'en tenir compte. Au contraire, lorsque l'impression lumineuse a cessé, la sensation ne se détruit com-

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, page 425.

plétement qu'au bout d'un temps très-appréciable; c'est ce qu'on appelle *la persistance de la sensation lumineuse.*

On peut observer directement le phénomène de la persistance en éteignant subitement une lampe sur laquelle on portait la vue; on continue alors à voir dans l'obscurité l'image de la flamme, et si l'on dirige l'œil dans une direction autre que celle qu'il avait, l'image persistante se meut en même temps, se maintenant constamment dans la position qui correspond à la partie impressionnée de la rétine. On pourrait aussi bien fermer subitement les yeux en les couvrant avec un mouchoir après avoir regardé un objet lumineux d'un éclat suffisant, comme une fenêtre éclairée; on voit alors l'image subsister pendant quelque temps; mais il arrive parfois que l'on aperçoit une image d'un aspect différent et qui appartient aux images accidentelles qui seront étudiées dans le paragraphe suivant.

On peut citer comme exemple de la persistance l'effet bien connu produit par un charbon ardent que l'on agite rapidement dans l'obscurité; on voit alors des traînées lumineuses comme si le charbon laissait dans l'air la trace de son passage. C'est à la même cause que l'on doit rapporter un grand nombre d'apparences que montrent des objets plus ou moins éclairés animés de divers mouvements; ainsi ce que l'on appelle les soleils des feux d'artifices lui doivent leurs brillants effets; la pluie, la grêle en tombant donnent, comme images, des lignes parallèles; une corde vibrante paraît renflée en son milieu, etc.

On pourrait indiquer bien des circonstances où l'on utilise la persistance, et à la fin de ce paragraphe on décrira des appareils très-curieux qui sont fondés sur son observation; mais on peut encore rappeler ici que M. Wheatstone (1), en éclairant vivement une petite sphère à surface réfléchissante fixée à l'extrémité de tiges vibrantes, a formé le *kaléidophone,* et que c'est sur ce principe que M. Lissajous (2) a basé les méthodes expérimentales dont il a fait usage pour comparer optiquement les nombres de vibrations de deux diapasons. M. Wheatstone a construit également un petit appareil photométrique dans lequel une perle brillante, qui se meut très-vite, donne au moyen des images des courbes lumineuses formées par la réflexion des deux lumières, l'indication de leurs différences d'intensité.

(1) Quarterly, *Journ. of sciences,* tom. 23, 1827.

(2) *Ann. de Chimie et de phys.,* 3e série, t. 51, p. 147.

On a vu dans le 1er volume, page 247 et suivantes, un exemple curieux du phénomène de persistance dans la construction du *phosphoroscope* qui donne aux corps phosphorescents une illumination et un éclat intermittent, lequel est rendu continu à l'observateur en vertu de la durée de la sensation sur la rétine. Si l'on se reporte à ce qui a été dit au sujet de la durée de la phosphorescence, page 260, on peut reconnaître qu'il y a une certaine analogie entre la manière d'être des corps phosphorescents, et les effets produits sur la rétine : sur les corps phosphorescents, l'illumination se fait dans un temps très-court, mais la persistance peut être plus ou moins longue, et est en général plus longue que le temps d'impression ; sur la rétine il en est de même et l'impression reçue dans un temps très-court persiste pendant un temps plus ou moins long.

La principale conclusion qui ressort de ces effets, c'est que des impressions lumineuses répétées avec une rapidité suffisante produisent le même effet sur l'œil qu'un éclairage continu.

D'Arcy (1) paraît avoir eu l'idée de mesurer le premier la durée de la persistance, en faisant mouvoir circulairement, dans l'obscurité, un charbon ardent de manière à obtenir l'apparence d'un anneau lumineux ; le temps de la révolution donnait la durée de la persistance de l'impression, car le corps lumineux repassait par chacune de ses positions antérieures au moment où l'image primitive n'était pas encore éteinte. Il a trouvé ainsi pour l'impression du charbon ardent $\frac{13}{100}$ de seconde.

Ce procédé ne donne pas une mesure absolue et totale de la persistance, et on ne peut en effet l'obtenir ; car une fois l'image formée dans l'œil, l'impression qui survit ne passe pas d'une manière continue du maximum au minimum, et elle s'affaiblit graduellement ; on ne peut donc avoir que le temps pendant lequel cette impression s'est maintenue sans perte sensible et non pas le temps qui sépare le moment où l'illumination cesse de celui où l'impression sur la rétine est prête à s'évanouir. L'analogie avec les effets de phosphorescence est encore ici manifeste.

M. Plateau (2) a cherché à modifier cette méthode en faisant usage

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 83, 1765.

(2) *Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites sur la vue*, Liége, 1829. — Herschel, *Traité d'optique*, traduct. française, t. 2, p. 473. — *Bulletin de l'Acad. de Bruxelles*, t. 16. — *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 58, p. 337.

de disques à secteurs alternativement blancs et noirs, puis colorés de différentes manières; et, dans ce cas, il cherchait la vitesse nécessaire pour qu'avec un éclairage ordinaire la surface fût uniformément éclairée. Les disques que l'on peut mettre en mouvement paraissent avoir été employés pour la première fois par Musschenbroeck (1). M. Plateau a trouvé, de cette manière, des valeurs sensiblement égales pour les différentes lumières, valeur dont la moyenne est 0″,34 c'est-à-dire environ $\frac{1}{3}$ de seconde. Mais, d'après ce que l'on va voir, la persistance dépendant de l'intensité lumineuse, comme on ne connaît pas le rapport des intensités relatives aux différentes couleurs, on ne peut accorder beaucoup de confiance à ce résultat. En effet, le temps peut être beaucoup plus court, ou beaucoup plus long selon que l'intensité de la lumière objective est plus ou moins forte, et que l'on considère une intensité plus ou moins grande de l'image retinienne finale, pour déterminer la durée totale de l'impression.

Voici quelles sont les conclusions des expériences diverses faites par M. Plateau avec des disques à secteurs alternatifs :

1° L'intervalle de temps pendant lequel une impression se conserve sans perte sensible est d'autant plus grand que l'impression est moins intense.

2° Ce temps, pour l'impression produite sur un papier blanc éclairé par la lumière du jour, est moindre que $\frac{1}{1000}$ de seconde. Pour un papier jaune il est un peu plus grand que pour un blanc, pour un papier rouge il est plus grand encore, et plus grand encore pour un papier bleu.

3° La durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande que cette impression est plus intense.

4° La durée totale de l'impression est d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus court, pourvu toutefois que ce temps soit suffisant pour développer une impression complète.

5° Lorsque l'impression provient d'un objet très-lumineux, tel que le soleil couchant ou même une fenêtre, elle passe ordinairement par une série de couleurs différentes (cet effet rentre dans les images accidentelles dont il sera question plus loin).

6° Enfin lorsque l'impression qui persiste sur la rétine provient d'un objet brillant, il arrive aussi quelquefois qu'elle disparaît et reparaît plusieurs fois avant de s'anéantir complétement.

(1) *Introduct. ad philos. natur.*, 1760.

On voit qu'entre autres conséquences, l'intensité lumineuse a une grande influence sur le phénomène de la persistance, et c'est en raison de cette circonstance que l'œil a le temps d'apprécier la forme d'une étincelle électrique dont la durée est très-faible, mais qui a une intensité considérable.

M. Aimé a imaginé une disposition ingénieuse pour l'étude de ces effets : concevons deux disques mobiles autour de leurs centres comme des roues, et placées sur un axe commun, mais disposés de façon à ce qu'on puisse les faire tourner en sens inverse avec une vitesse variable à volonté et égale pour les deux. L'un des disques est percé d'un certain nombre d'ouvertures en forme de secteurs étroits, égaux et symétriquement placés comme les rayons d'une roue ; l'autre ne présente qu'une ouverture égale à l'une des précédentes. Si l'appareil est placé devant une vive lumière, comme au volet d'une chambre noire, quand on mettra les roues en mouvement, l'œil étant placé dans la direction de l'axe, l'ouverture unique du second cercle se trouvera correspondre successivement à chacune des ouvertures du premier. Lorsque la vitesse de rotation est faible, l'effet produit doit être une succession de semblables apparences qui se montrent l'une après l'autre dans le sens du mouvement de l'ouverture unique, et qui disparaissent l'une après l'autre, de telle manière qu'on ne voit jamais qu'un secteur lumineux. Mais si la vitesse de rotation devient plus grande, l'impression produite sur la rétine ne sera pas encore éteinte lorsque la superposition suivante aura lieu, et l'on verra deux secteurs ; si la vitesse augmente encore on en verra trois, puis quatre, etc., et connaissant pour une vitesse donnée le nombre des secteurs aperçus simultanément, il sera aisé d'en déduire la valeur approchée de la durée de l'impression produite pour chacun d'eux; cette durée n'est relative qu'à une certaine limite d'intensité, bien entendu, car elle varie en raison des circonstances dans lesquelles se fait l'expérience, de l'intensité lumineuse, de la fatigue de l'œil, etc.

Des expériences analogues à celles de M. Plateau sur les disques rotatifs ont été faites par différents observateurs, et les résultats numériques obtenus varient; mais tous s'accordent pour reconnaître qu'en faisant usage de secteurs alternativement noirs et blancs, ou noirs et colorés, pour obtenir une teinte uniforme en les faisant tourner, la vitesse doit être d'autant plus grande que l'intensité lumineuse est plus forte, ce qui provient de ce que la persistance est d'autant plus grande que l'intensité lumineuse l'est elle-même davantage.

M. Plateau a fait une remarque intéressante consistant en ce que, si l'on change le rapport de grandeur des secteurs blancs et noirs sans changer leur nombre, à égalité d'éclairage, la vitesse nécessaire pour rendre l'impression uniforme ne change pas; ce résultat tient probablement à ce que dans les parties où les secteurs blancs sont plus larges, l'impression lumineuse est plus forte et diminue plus vite quand l'excitation cesse.

M. Helmholtz, en mesurant par ce procédé le temps que met un secteur blanc ou noir à passer pour produire une égale clarté sur le cercle, a trouvé $\frac{1}{24}$ de seconde pour une forte lampe et $\frac{1}{10}$ de seconde pour une lumière faible, ce temps variant avec l'intensité lumineuse comme on l'a vu.

Ces expériences à proprement parler ne permettent pas de mesurer la persistance, car elles ne donnent qu'une comparaison entre la période d'établissement de la sensation et les premiers instants de la période de diminution quand la lumière excitatrice vient à cesser d'agir. Elles conduisent néanmoins à cette conséquence que l'impression lumineuse momentanée ne dépend que de la quantité de lumière qui est tombée sur la rétine; cette impression est donc la même pour une lumière très-intense qui agit pendant un temps très-court que pour une faible lumière qui agit pendant plus longtemps, avec cette condition que la durée de cette action n'atteigne pas $\frac{1}{30}$ de seconde (1).

Il résulte de là que l'on n'a pas conscience des variations de la sensation qui se passent dans un temps inférieur à $\frac{1}{30}$ de seconde; d'un autre côté, comme on l'a déjà fait remarquer, la durée peut être suppléée par l'intensité, et c'est pour ce motif que l'on distingue les étincelles électriques, dont la durée ne dépasse pas $\frac{1}{100000}$ de seconde, et que l'on voit les objets éclairés par ces étincelles quand ils sont en mouvement : comme la portion de trajectoire que ces objets peuvent décrire pendant ce temps est excessivement courte (ce ne serait que 5 millimètres pour une balle de fusil lancée à une vitesse de 500 mètres par seconde), ces objets nous paraissent immobiles.

S'il s'agit d'objets se mouvant avec une vitesse beaucoup moindre, il en sera encore ainsi à plus forte raison, même si l'éclairement avait une durée beaucoup moins courte que celle de l'étincelle électrique. Cela posé, que l'on imagine une suite d'objets semblables, par exemple

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 457.

les dents d'une roue, se suivant à des intervalles de temps parfaitement égaux, si l'on éclaire ces objets, ou simplement le champ sur lequel ils se projettent, par de la lumière intermittente dont les éclats se produisent à des intertervalles de temps égaux entre eux, trois cas pourront se présenter : ou bien l'intervalle des éclats sera égal à celui qui sépare les passages de deux dents consécutives, et, comme elles sont toutes semblables, elles paraîtront toujours dans la même position au moment de l'éclairement, la roue semblera immobile; ou bien les éclats seront plus rapprochés que le passage de deux dents consécutives, et alors la roue étant saisie par l'éclat lumineux avant d'avoir avancé d'une dent, il semblera qu'elle tourne en sens inverse de son mouvement réel; dans le troisième cas l'inverse aurait lieu, c'est-à-dire que si les éclats de la lumière intermittente étaient plus éloignés que les passages de deux dents consécutives de la roue, celle-ci paraîtrait tourner dans le sens même de sa rotation.

Cet emploi de l'éclairage intermittent a permis d'apprécier les vitesses de corps mobiles et réciproquement; c'est ainsi que M. Wheatstone, en éclairant avec des étincelles électriques le champ d'un microscope, a pu distinguer les organes mobiles des rotifères. D'un autre côté Savart (1) est l'un des premiers physiciens qui aient employé l'éclairage intermittent pour étudier la constitution des veines fluides. L'appareil dont il a fait usage consiste essentiellement en un large ruban dont la surface est partagée en bandes transversales alternativement blanches et noires et auquel on peut donner un mouvement rapide dans le sens de sa longueur. Le liquide étant supposé couler verticalement, on place le ruban mobile derrière la veine et dans une position parallèle à celle-ci; alors en imprimant à la bande un mouvement dont la rapidité soit suffisante, l'œil placé devant le système peut distinguer les diverses particularités que présente la veine, tels que les renflements annulaires qui se propagent le long de la portion de la veine contiguë à l'orifice. Cet effet est analogue à ceux qui se produisent quand deux roues tournent avec rapidité l'une derrière l'autre, dans des plans parallèles et rapprochés, et avec des vitesses égales de grandeur et de direction.

Le *thaumatrope* imaginé par le docteur Paris (2) est un petit rectangle de carton que l'on fait tourner autour d'un axe passant par les

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, t. 53, p. 348, 1833.
(2) *Journal d'Édimbourg*, t. 7, p. 87. — *Ann. de Poggend.*, t. 10.

milieux des côtés les plus longs; cet axe est réalisé simplement par un fil dont on tient un bout dans chaque main en lui donnant un mouvement de torsion et de tension alternatives. Sur l'une des deux moitiés, d'un côté, on peint ordinairement une cage; sur l'autre moitié, de l'autre côté, est un oiseau; pendant la rotation l'oiseau paraît être dans la cage, en raison de la persistance des deux images dans les points occupés successivement par elles.

Dans le *phénakisticope*, inventé par M. Plateau (1) en même temps que les *disques stroboscopiques* de M. Stampfer qui produisent le même effet, on se sert de la persistance des impressions pour produire sur l'œil des illusions tendant à faire juger du mouvement de certaines figures. Étant données un certain nombre d'images, représentant par exemple les diverses positions successives du mouvement d'un homme qui frappe avec un marteau, si ces images sont rangées en cercle sur un disque de manière à venir occuper successivement la même place lorsqu'on donne à ce disque un mouvement assez rapide de rotation, et si on dispose tellement les choses que l'œil ne puisse voir ces images qu'au moment où elles occupent une place déterminée, il semble que ces figures passent d'une manière continue par tous les degrés de forme intermédiaires, et que par conséquent il y a un véritable mouvement du personnage. Il y a donc là en même temps qu'un effet de persistance une illusion du jugement, tenant à ce que l'on néglige, dans l'appréciation, la notion de l'intermittence de la vision, condition étrangère aux circonstances dans lesquelles se fait l'éducation du sens de la vue.

On réalise de différentes manières le principe fondamental de ces appareils : on peut se servir de deux disques parallèles placés à une distance assez grande pour que la lumière puisse venir éclairer fortement l'un d'eux sur lequel sont dessinées les figures; en face de celles-ci, sur l'autre disque, sont pratiquées d'étroites ouvertures par lesquelles l'œil de l'observateur les regarde; les deux disques sont animés d'un même mouvement de rotation. On peut aussi n'employer qu'un seul disque qui porte à la fois les ouvertures et les figures, qui sont alors vues par réflexion sur un miroir.

Comme instruments fondés sur la persistance des images sur la rétine,

(1) *Correspondance math. et phys. de Bruxelles*, t. 4, p. 393, 1828; t. 6, p. 121, 1830; t. 7, p. 365. — *Ann. de chimie et de phys.*, 2e série, t. 53, p. 304.

on peut citer encore l'*anorthoscope* de M. Plateau (1) et le *dedaleum* de M. Hörner (2) : dans ce dernier appareil on obtient les illusions du phénakisticope, en faisant tourner un cylindre creux de 20 cent. de diamètre environ, à l'intérieur duquel sont dessinées les figures ; à chacune de celles-ci correspond une ouverture diamétralement opposée par laquelle on regarde.

### § 3. *Images accidentelles.*

On a vu dans le paragraphe précédent qu'après avoir regardé fixement un objet lumineux, si l'on vient à fermer subitement les yeux l'image persiste pendant quelque temps ; mais elle ne tarde pas à diminuer d'intensité et même à changer de couleur de façon à présenter la couleur complémentaire de l'objet, et l'on peut avoir ainsi plusieurs alternatives d'intensité et de coloration suivant la couleur de l'objet, l'intensité de son éclat et la durée pendant laquelle l'image objective a impressionné la rétine. Ces effets, qui succèdent à la persistance, dépendent de ce que l'on a nommé les *images accidentelles.*

On peut les voir également après l'action lumineuse en portant les yeux sur une surface éclairée : ainsi, en regardant fixement un objet coloré sur un fond noir, on voit au bout de quelque temps la couleur de cet objet perdre peu à peu de son éclat ; si alors on porte les yeux sur une surface blanche, comme le plafond de la chambre où l'on se trouve, on voit paraître une image de même forme que l'objet, mais d'une couleur complémentaire. Si l'objet est une feuille de papier rouge il donne naissance à une image de couleur complémentaire ou verte ; réciproquement, en fixant un objet ou une feuille de papier verte, on voit une image accidentelle rouge. Si l'objet est jaune ou bleu l'image sera violette ou orangée, et vice versa.

La disparition de ces images n'a pas lieu en général par un changement graduel et continu ; elles offrent des alternatives d'intensité et de colorations diverses, car on voit quelquefois reparaître à plusieurs reprises l'image primitive.

Si l'on n'a pas égard à la couleur des images, mais seulement à leur intensité, on désigne sous le nom d'*images négatives* celles dont l'in-

(1) *Bullet. de l'Acad. de Bruxelles*, t. 3. — *Ann. de Poggend.*, t. 37, p. 464.
(2) *Ann. de Pogg.*, t. 32, p. 650.

tensité est plus faible que l'intensité du champ éclairé qui les entoure, par opposition aux *images positives* dans lesquelles l'intensité est plus grande que celle des parties voisines. Quand, dans la première expérience, après l'action de la lumière objective, on admet dans l'œil une lumière d'une intensité convenable, l'image persistante, qui était positive, devient négative, et il se produit des alternatives d'intensité en même temps que des changements de coloration.

Les effets de même genre qui ont lieu quand les yeux sont fermés ne doivent pas être considérés comme se produisant exclusivement par suite d'une excitation limitée aux contours de l'image objective, car les paupières laissent toujours passer une certaine quantité de rayons, et même en l'absence de ceux-ci, dans la chambre noire, il reste encore l'excitation interne à laquelle on a donné le nom de lumière propre de la rétine et dont on a déjà parlé page 325.

Ces effets d'éclairement sont variables avec certaines causes peu appréciables, telles que la pression plus ou moins forte des paupières, des mouvements communiqués au globe de l'œil, des pressions extérieures, certains mouvements du corps, et peuvent donner lieu à des alternatives d'images accidentelles positives ou négatives diversement colorées.

Si, dans les expériences indiquées plus haut, au lieu de porter les yeux sur un écran blanc, après avoir observé pendant quelque temps un objet éclairé, on fixe les regards sur une surface colorée, alors les couleurs accidentelles se combinent avec les couleurs réelles, c'est-à-dire que du rouge accidentel sur une surface bleue donne du violet, etc. Mais il y a ici une question d'intensité et de vivacité de nuance qui peut dépendre des couleurs en présence, en donnant lieu à des effets de contraste dont on parlera dans le paragraphe suivant. On doit dire également que l'image accidentelle peut paraître plus ou moins grande selon la distance de la surface sur laquelle on la projette, ce qui est aisé à comprendre; en outre les bords en sont plus ou moins tranchés, comme si par irradiation la sensation s'étendait au delà des limites de l'image réelle.

Les apparences des diverses intensités des images accidentelles paraissent avoir été observées, il y a plus de deux siècles, par Peiresc (1), et ont donné lieu à des observations intéressantes de divers physiciens;

(1) *Vita*, p. 175 (1634). — Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 506.

Jurin (1), un siècle après, en donna une théorie qui a de l'analogie avec celle de M. Plateau dont il va être question plus loin ; Buffon (2) décrivit ces phénomènes d'une manière assez complète et le père Scherffer (3) les attribua à une diminution de sensibilité de la rétine, explication qui forme la base de celle de M. Fechner. On peut citer encore quelques observations intéressantes faites par Rozier (4) et se rapportant à la succession des images accidentelles après une seule impression de la rétine. Depuis, elles ont fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles on doit distinguer les travaux de M. Plateau (5) et ceux de M. Fechner (6) comme résumant les opinions principales entre lesquelles les physiciens se trouvent partagés.

M. Plateau, en comparant les impressions accidentelles aux impressions réelles correspondantes, admet qu'elles doivent être regardées comme d'une nature opposée à la première ; ainsi, d'après lui, les impressions sur la rétine données par deux couleurs complémentaires seraient dues à des mouvements opposés transmis à notre œil. Il se fonde sur différents effets et entre autres sur les suivants :

1° Les teintes de deux couleurs complémentaires se neutralisent en formant du blanc, mais, dans le cas d'une impression réelle et d'une impression accidentelle correspondante, cette opposition peut produire du noir, car, suivant ses recherches, si l'on projette une image accidentelle sur une surface dont la couleur est complémentaire de la sienne, l'image ne paraît que d'un gris foncé comme si la sensation était en partie détruite en cet endroit.

2° Tandis que deux couleurs réelles complémentaires produisent du blanc par leur combinaison, deux couleurs accidentelles complémentaires produisent du noir.

Ainsi, suivant cette manière de voir, quand la rétine est subitement soustraite à l'action émanée de l'objet coloré, l'état d'excitation de l'organe dans les parties frappées par la lumière et à une certaine distance en vertu de l'irradiation, persévère d'abord sans changer de nature ; mais

(1) *Smith's optics*, Cambridge, 1738.

(2) *Mémoires de l'Acad. des sciences*, t. 61 (1743).

(3) *Journal p physique*, t. 26 (1785).

(4) *Journal de physique*, t. 6, p. 486.

(5) *Essai d'une théorie générale comprenant les apparences visuelles*, Bruxelles, 1834). — *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 53, et t. 58. — Herschel, *traité d'optique*, traduction française, t. 2, p. 490.

(6) *Ann. de poggend.*, tomes 44, 45 et 50.

bientôt cet état fait place à un état opposé d'où résulte l'image accidentelle. Cette sensation atteint son maximum, s'affaiblit à son tour en présentant ordinairement une marche oscillatoire, car, d'après ce que l'on a dit, elle peut présenter des passages de la couleur primitive à la couleur complémentaire.

M. Plateau voit donc une grande analogie entre ces phénomènes et le mouvement d'un corps écarté d'une position d'équilibre stable et qui y revient par un mouvement oscillatoire. Cette théorie est ingénieuse et appuyée par des expériences nombreuses et bien conçues; mais comment admettre que deux lumières de couleurs complémentaires donnent des activités oposées à la rétine? Lorsque la rétine perçoit la sensation colorée due à une image accidentelle, l'impression doit être la même que si la rétine était frappée par les rayons colorés de cette nuance; or il est bien difficile d'admettre que des rayons colorés, qui diffèrent seulement par leur longueur d'onde, donnent lieu à deux mouvements opposés ou à deux activités opposées sur la rétine.

L'hypothèse du père Scherffer, étendue par M. Fechner, est basée également sur une modification physique de la rétine : elle consiste à supposer que la rétine excitée fortement par une lumière colorée déterminée, éprouve une certaine fatigue et est momentanément moins impressionnable sous l'action de cette lumière que sous l'influence des autres rayons; la théorie d'Young sur le mécanisme de la sensation des couleurs dont on a parlé antérieurement page 337 en rend aisément compte, mais on peut également le concevoir sans admettre des fibres nerveuses différentes pour l'appréciation des couleurs.

D'après cette hypothèse, on explique aisément les images accidentelles que l'on voit quand ayant fixé un objet lumineux on jette les yeux sur un champ blanc ou coloré; en effet, l'œil percevant mieux les rayons autres que ceux qui l'ont impressionné primitivement, voit principalement ceux qui, réunis aux premiers, forment du blanc, par conséquent voit la couleur complémentaire. On peut aussi comprendre l'alternative de ces images colorées; mais comment expliquer les images accidentelles quand, ayant fixé un objet coloré, on se trouve dans l'obscurité? M. Plateau croyait que cette objection était une des plus graves que l'on pût faire à cette explication : mais d'abord, comme on vient de le dire page précédente, on ne peut considérer le champ visuel comme privé d'excitation, et, d'un autre côté, il faut se rappeler les phénomènes de persistance dont il a été question précédemment, page 351; comme

dans une certaine limite la durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande qu'on a regardé un objet lumineux pendant un temps plus court, si l'organe a été fortement impressionné par une lumière dans laquelle les rayons colorés sont inégalement répartis, les rayons de couleur complémentaires à ceux qui existaient en plus grande quantité doivent donner une persistance plus grande, l'œil étant fatigué pour la perception des autres. Ainsi la fatigue momentanée de la rétine jointe aux effets de persistance et d'excitation des diverses parties de l'organe de la vue donneraient lieu aux images accidentelles que l'on perçoit dans les diverses circonstances des expériences.

Cette théorie paraît donner, du reste, l'explication du plus grand nombre de faits observés et semble préférable à celle de M. Plateau ; ainsi que le remarque M. Helmholtz, il se rencontre bien quelques phénomènes dont on ne peut encore rendre compte d'une manière complétement satisfaisante, mais néanmoins ce physiologiste n'a pu en trouver qui fussent incompatibles avec les principes qui viennent d'être énoncés.

### § 4. *Contraste. Contraste simultané; contraste successif.*

Lorsque deux images colorées sont près l'une de l'autre, leur juxtaposition a pour résultat de faire paraître plus sombres les parties voisines des espaces clairs, et réciproquement, ou bien de donner aux couleurs voisines une teinte complémentaire de celle de l'objet examiné.

Cette influence du voisinage des couleurs était déjà connue de Léonard de Vinci (1), et depuis deux siècles un grand nombre de savants se sont livrés à des recherches très-intéressantes sur les effets qu'elle produisait et sur l'explication qu'on pouvait en donner. Rumfort (2), entre autres, à la fin du siècle dernier, décrivit les effets des ombres colorées dont il va être question ci-après ; Prieur (3), dans les études auxquelles il se livra, réunit les phénomènes sous la dénomination d'effets de *contraste* qu'ils ont aujourd'hui, et M. Chevreul (4) donna une description exacte des modifications que subissent les différentes couleurs par leur

(1) *Trattato della pittura.* — Helmholtz, *Optique phys.*, p. 545.
(2) *Philosoph. transact.*, t. 84, p. 107 (1794).
(3) *Ann. de chimie*, t. 54 (1805).
(4) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 11, 1832; *de la loi du contraste simultané des couleurs* (1839). — *Comptes rendus*, t. 47 (1858).

juxtaposition, et classa les divers phénomènes qui se rapportent à l'étude de cette question. M. Chevreul a distingué les effets de *contraste simultané* des effets de *contraste successif* et même des effets de *contraste mixte;* mais ces derniers effets rentrent dans les phénomènes des images accidentelles, et l'on doit surtout examiner ici ceux qui dépendent du contraste simultané.

Avant d'indiquer quelle peut être la cause des effets dont il s'agit, il faut exposer les circonstances principales dans lesquelles on les observe.

Un des effets les plus favorables pour la vivacité du contraste est le phénomène des ombres colorées observé par Rumfort. On a déjà vu dans le tome Ier, page 99, quel était le procédé employé par Rumfort pour comparer les intensités lumineuses de deux lumières différentes : Une

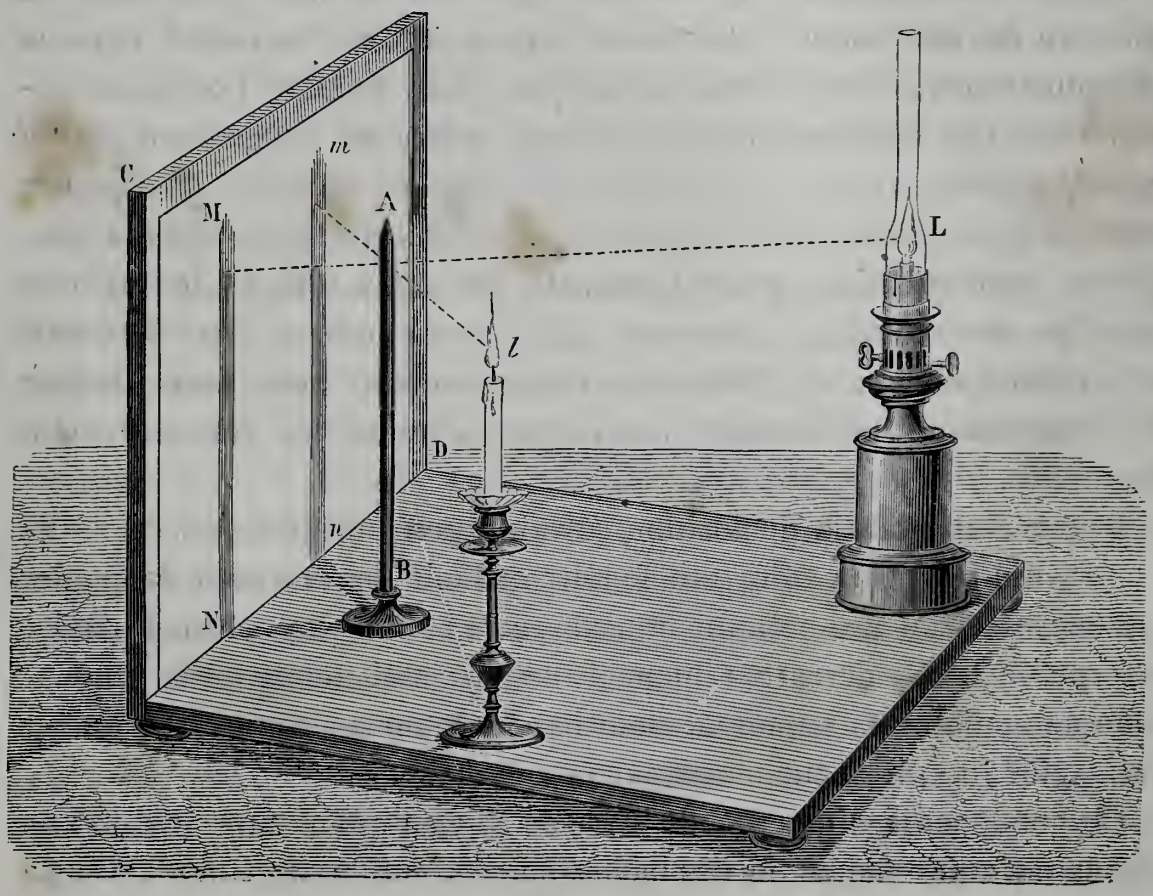



Fig. 5.

lampe L et une bougie l étant devant un écran en papier CD dans une chambre obscure, on place une tige opaque AB et l'on dispose les deux lumières de manière à projeter sur l'écran deux ombres MN, mn, très-rapprochées l'une de l'autre, de façon à ce que l'inclinaison des rayons incidents lAm, LAM, soit la même. On recule alors la flamme la plus

vive L, ou l'on approche celle qui l'est moins, jusqu'à ce que les deux ombres paraissent de même intensité; si l'on remarque que l'ombre de chaque lumière est éclairée par l'autre , et que le reste de l'écran reçoit la somme des clartés des deux lumières, on voit que l'égalité des ombres indique l'instant où chaque lumière donne la même clarté à une même surface de l'écran. Mais ce qu'il y a de remarquable au point de vue des phénomènes qui nous occupent ici, c'est que s'il existe la moindre différence dans la couleur des deux lumières elle apparaît immédiatement; si l'une d'elles, la bougie l par exemple, est jaunâtre, l'ombre MN offre cette teinte jaune, mais en outre mn apparaît colorée de la couleur complémentaire de celle du fond qui est un mélange des deux lumières, et cette teinte de mn est bleuâtre.

On peut aisément, à la place d'une des deux lumières, employer la lumière du jour ou un faisceau de rayons solaires introduit dans la chambre noire, et les effets sont très-tranchés. Lorsque l'on place devant une des lumières L ou l un verre coloré en rouge, son ombre paraît aussitôt verte; si le verre est jaune la couleur de l'ombre devient bleue, mais il faut pour que les colorations présentent la plus grande netteté qu'on égalise l'intensité des deux sources lumineuses que les deux ombres paraissent également sombres. Ces effets sont très-remarquables, et l'influence d'une couleur pour nous donner le sentiment de la couleur complémentaire est ici très-nettement manifeste.

Prieur employait la disposition suivante pour observer des effets de contraste : il plaçait entre une fenêtre et l'œil un morceau de papier coloré possédant une certaine transparence, et il appliquait sur le papier une petite bande de carton blanc; elle paraissait teinte de la couleur complémentaire du papier. Ainsi la bande de carton paraissait rose sur un papier vert, lilas sur un papier jaune, etc.

On peut encore faire usage du procédé suivant qui est très-simple : on forme des raies noires ou des taches noires, cercles ou carrés, avec de l'encre, sur des papiers de couleur, rouges, verts, jaunes, etc.; puis, on place sur ces papiers une feuille de papier mince translucide et on examine au jour l'ensemble de ces surfaces.

Le papier translucide donne de l'égalité de ton aux images en répandant une certaine quantité de lumière blanche; sur les parties noires le fond du papier paraît alors légèrement nuancé de la couleur du papier coloré qui est vu par transmission, mais les barres et les taches

sont vues avec la couleur complémentaire. Ainsi, sur un papier rouge, ces raies ou ces taches paraissent vertes; sur un papier bleu elles semblent jaunes, etc.

M. Chevreul a prouvé d'une manière générale que cette modification dans la perception des images colorées est réciproque, c'est-à-dire que lorsqu'on voit simultanément deux objets colorés dans le voisinage l'un de l'autre, les deux couleurs semblent réagir mutuellement de manière qu'à chacune d'elles s'ajoute la complémentaire de l'autre. Voici le procédé qu'il a employé pour faire cette démonstration : on place sur une feuille de papier ou de carton deux bandes de papier ou d'étoffe teintes des deux couleurs que l'on veut soumettre à l'observation; l'une par exemple est rouge, l'autre jaune ; ces deux bandes doivent avoir 12 millimètres de largeur et 60 millimètres de longueur. On place parallèlement à l'une de ces bandes, et à la distance d'un millimètre, une seconde bande qui lui soit identique en dimension et en couleur, et qui est destinée servir de terme de comparaison; on dispo parallèlement à l'autre bande et à la même distance d'un millimètre, une bande qui lui soit également identique et l'on a ainsi quatre bandes colorées : deux d'une couleur d'un côté du carton, à droite de la ligne médiane, par exemple, et les deux autres de l'autre côté à gauche. Les deux bandes intérieures se touchent par leur plus grand côté, et la ligne de contact forme la ligne médiane; elles ont des couleurs différentes et c'est sur elles que l'on observe l'action mutuelle des deux couleurs.

Il suffit pour juger de l'effet de regarder la surface à la distance de la vision distincte dans un certain sens par rapport à la lumière incidente pendant quelques secondes. Le contraste qui échapperait dans les circonstances ordinaires, devient presque toujours appréciable à l'aide des deux bandes extrêmes servant de termes de comparaison. Ainsi, avec les bandes rouges et jaunes, la bande rouge intérieure deviendra un peu violette et la bande jaune contiguë paraîtra verdâtre.

Le principe général que M. Chevreul a déduit de ses nombreuses expériences consiste en ce que quand deux couleurs juxtaposées sont vues simultanément, elles s'influencent mutuellement de sorte qu'à chacune d'elles s'ajoute le complémentaire de l'autre. Il est facile alors de rendre compte des différents effets observés dans les conditions suivantes :

1° Lorsque les deux couleurs sont complémentaires l'une de l'autre, comme le rouge et le vert, le jaune et le violet, elles s'avivent par la juxtaposition et acquièrent de l'éclat.

2° Quand on juxtapose une couleur quelconque avec une surface blanche, cette dernière se teint de la couleur complémentaire ; en même temps la couleur employée devient plus brillante et plus foncée, car la complémentaire du blanc étant le noir, d'après le principe énoncé la couleur employée doit devenir plus sombre. Exemple : par la juxtaposition du rouge avec le blanc ce dernier prend une teinte légèrement verdâtre et le rouge devient plus sombre.

3° Si l'on juxtapose une couleur avec une surface noire, cette dernière prend d'une manière plus ou moins prononcée une légère teinte complémentaire, mais cette couleur employée devient plus brillante et plus claire ; car la complémentaire du noir est le blanc qui se réunit à la couleur employée pour produire cet effet.

4° En vertu du même principe, si dans les deux couleurs juxtaposées il y a une couleur commune aux deux, elle tend à s'affaiblir.

Le blanc et le noir éprouvent aussi par leur juxtaposition une modification réciproque, le premier devenant plus éclatant et le second plus sombre.

De même si deux objets voisins diffèrent en clarté, cette différence paraît en général augmentée par leur voisinage ; on peut donc aisément comprendre que des objets faiblement éclairés peuvent disparaître complétement lorsque leur image se peint sur la rétine dans le voisinage d'une partie fortement éclairée par un objet brillant.

On peut se rendre compte d'un effet curieux observé lorsqu'on superpose par gradins des bandes de papier colorées par teintes plates avec de l'encre de Chine et de façon que la coloration aille en croissant de l'une à l'autre.

En éclairant la surface totale, l'intensité de la lumière est évidemment la même dans toute l'étendue de chaque bande ; cependant chacune d'elles, par contraste, paraît plus foncée sur le bord qui touche à une bande plus claire, et plus claire sur le bord en contact avec une bande plus foncée, de sorte que l'ensemble donne par illusion une apparence de cannelure aux différentes bandes (1).

Les observations de M. Chevreul ont montré que les modifications mutuelles des couleurs ne sont pas bornées au cas où les objets colorés sont contigus l'un à l'autre ; il a prouvé qu'on pouvait les rendre sensibles même quand ils sont séparés par un intervalle de 5 centimètres,

(1) Chevreul, *Contraste simultané*, planche 1, fig. 3.

mais alors l'intensité de l'effet est d'autant moindre que la distance est plus grande.

Ces effets se produisent dans un grand nombre de circonstances ; ainsi quand un appartement, dont les murs sont revêtus d'une couleur vive, est éclairé par le soleil, les parties de l'ameublement éclairées par diffusion semblent se teindre d'une couleur complémentaire de celle des murs. De même quand on imprime des dessins sur des étoffes ou des papiers colorés, la couleur de ces dessins est ordinairement modifiée par la couleur complémentaire de celle du fond ; par les mêmes motifs, si l'on veut produire des dessins blancs sur des fonds colorés, par exemple sur fond vert, il faut que les dessins soient légèrement verdâtres pour former du gris en neutralisant la couleur complémentaire rose que le fond donnerait par contraste ; car, si ces dessins étaient blancs en réalité, ils paraîtraient roses.

M. Chevreul a montré comment toutes ces observations sur les sensations chromatiques pouvaient être utilisées dans les arts pour faire valoir les tons des couleurs employées dans la peinture ou dans les étoffes.

On a dit précédemment que si, au lieu d'examiner les effets produits par la vision simultanée d'objets colorés, on portait successivement les yeux sur des fonds de diverses couleurs, on pouvait observer des changements dépendant des images accidentelles et rentrant dans les phénomènes de *contraste successifs*. En effet, si l'on regarde par exemple pendant longtemps une couleur rouge éclatante fixée sur une large surface, on voit à mesure que l'œil se fatigue la couleur se ternir et faire place à une nuance briquetée différente de la première. Cet effet est dû à la disposition que l'œil prend à voir la couleur verte complémentaire du rouge comme on l'a dit antérieurement, page 356 ; car cette couleur, s'ajoutant au rouge par contraste, donne la nuance briquetée. On peut remarquer du reste que les colorations par contraste dans les images accidentelles sont très-vives.

On comprend aisément comment les couleurs des objets doivent varier quand, au lieu de les éclairer avec la lumière blanche, on se sert de lumières artificielles colorées différemment : la composition de la lumière incidente influe d'abord, car les divers rayons colorés diffusés par les objets sont alors en plus ou moins grande proportion ; mais, en outre, les corps qui entourent ces objets changeant de nuances par les mêmes motifs, l'effet du contraste des couleurs peut devenir

différent de ce qu'il était avec la lumière blanche. En général plus on se rapprochera d'une lumière ayant moins de rayons de diverses réfrangibilités, plus les couleurs des objets auront de tendance à se rapprocher les unes des autres. C'est ainsi que les tons bleus et verts sont moins différents à la lumière du gaz ou des lampes qu'à la lumière blanche (1).

Pour expliquer tous ces phénomènes, on a supposé soit une modification physique de la rétine, c'est-à-dire une altération de la sensation, soit une différence dans l'appréciation. M. Plateau (2), qui admet le premier genre d'action, a rattaché les phénomènes de contraste à sa théorie des couleurs accidentelles; la rétine, suivant lui, pourrait, à distance comme après des temps différents, osciller entre des états d'excitation contraires : dans le voisinage immédiat de la partie excitée se présenterait une phase semblable donnant lieu aux effets d'irradiation, mais à une distance plus grande la phase contraire donnerait lieu au contraste. Cependant il n'a pas rejeté complétement l'intervention du contraste ou de l'influence exercée l'une sur l'autre par deux couleurs voisines ; il pense que cette influence, dans certains cas, peut accroître les effets observés.

L'autre hypothèse, dont l'idée est due à Prieur (3), consiste à admettre sous le nom de *contraste* une cause morale faisant ressortir ce que deux couleurs mises en présence ont de dissemblable en affaiblissant le sentiment de ce qu'elles ont de commun. M. Helmholtz admet cette manière de voir (4) et il pense même que l'habitude dans l'appréciation des couleurs doit exercer une grande influence sur les effets observés, de sorte que le contraste doit présenter moins de vivacité à des yeux exercés qu'aux yeux qui ne le sont pas. Toutes ses expériences l'ont conduit à cette conclusion que l'appréciation des couleurs, dans les phénomènes de contraste simultané, provient d'un acte du jugement, bien qu'on ne puisse pas en donner jusqu'ici de preuve satisfaisante.

(1) Voir Chevreul, ouvrage cité précédemment, et *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 62, p. 93.

(2) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 58. — Herschel, *Traité d'optique*, trad. franç., t. 2, p. 513.

(3) *Ann. de chim.*, t. 54, *Mém.* cité plus haut.

(4) *Optique physiologique*, p. 510.

### § 5. *Vision binoculaire. Stéréoscope; Pseudoscope.*

Les phénomènes visuels viennent d'être étudiés indépendamment du concours des deux yeux; il faut examiner maintenant quelle peut être l'influence de l'action simultanée de ces organes. N'ayant en vue dans cet ouvrage que les effets de la lumière, il n'a pas été question des sujets relatifs à la marche des rayons lumineux ainsi qu'à la direction de l'axe visuel; néanmoins il est utile, pour terminer ce sujet, de parler de quelques-uns des phénomènes les plus intéressants qui se rapportent à la vision binoculaire.

Cette partie de l'optique a été le sujet de nombreux travaux de la part des physiciens et des physiologistes sans que l'on puisse donner avec certitude la solution des questions qui s'y rapportent. On a fait plusieurs hypothèses depuis Galien (1) pour expliquer la vision simple avec les deux yeux; ainsi on a admis une réunion dans l'encéphale de fibres nerveuses provenant de points correspondants des deux rétines; on a supposé que l'on ne voit successivement qu'avec un seul œil; enfin, ce qui paraît le plus probable, on a pensé que la vision simple dépendait de la manière dont nous interprétions nos sensations visuelles.

Mais avant de donner plus de détails sur ce point, il est nécessaire de décrire le *stéréoscope* dont la découverte est due à M. Wheatstone (2), car les expériences que l'on peut faire au moyen de cet appareil, ainsi que la combinaison des couleurs vues séparément avec chacun des yeux, permettent de mieux apprécier les différentes circonstances de la vision binoculaire.

Si l'on est placé à quelque distance d'un objet, d'un cube par exemple, et qu'on le regarde successivement avec l'œil droit et avec l'œil gauche, on ne percevra pas, dans les deux cas, la même projection, car on voit l'objet dans le premier cas un peu plus à droite et dans le second un peu plus à gauche. Supposons donc que l'on dessine sur deux feuilles de papier les deux projections planes de l'objet et que l'on puisse faire en sorte que chacun des yeux ne voie que la projection qui lui convienne; alors l'observateur percevra une seule image, mais avec la sensation du relief. L'appareil découvert par M. Wheatstone

(1) Helmholtz, *Optique physiolog.*, p. 959.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 2me série, t. 2, p. 330. — *Philosoph. transact.* 1838, partie 2.

réalise une disposition qui permet d'atteindre ce but : deux glaces inclinées à 45° sur un plan perpendiculaire à l'axe qui joint les deux yeux sont juxtaposées de façon qu'on puisse approcher les yeux de leur arête commune; il est évident alors que le miroir de droite ne donnera que des rayons qui seront vus par l'œil droit et le miroir de gauche des rayons arrivant dans l'œil gauche. On place alors les deux images qui portent les projections différentes d'un même objet en face des deux miroirs, on incline ou en approche plus ou moins ces images, et en cherchant la position qui leur convient pour que les axes optiques correspondant aux mêmes points viennent converger à la distance de la vision distincte, on ne voit qu'une seule image provenant des deux images différentes, chacune d'elles étant perçue simultanément par chacun des yeux ; mais cette image donne la sensation du relief.

Non-seulement on peut voir en relief de cette manière des figures de géométrie même très-compliquées, et dans ce cas les effets de reliefs sont très-saisissants, mais encore en peut représenter des vues, des paysages, etc.; alors, pour obtenir les deux images de ces objets dans les positions convenables, on se sert d'images photographiques prises à la fois avec une chambre noire à deux objectifs, de façon à ce que chaque image soit la projection que chacun des organes doit examiner, ou bien l'on fait usage d'épreuves obtenues avec un seul objectif placé successivement dans deux positions différentes.

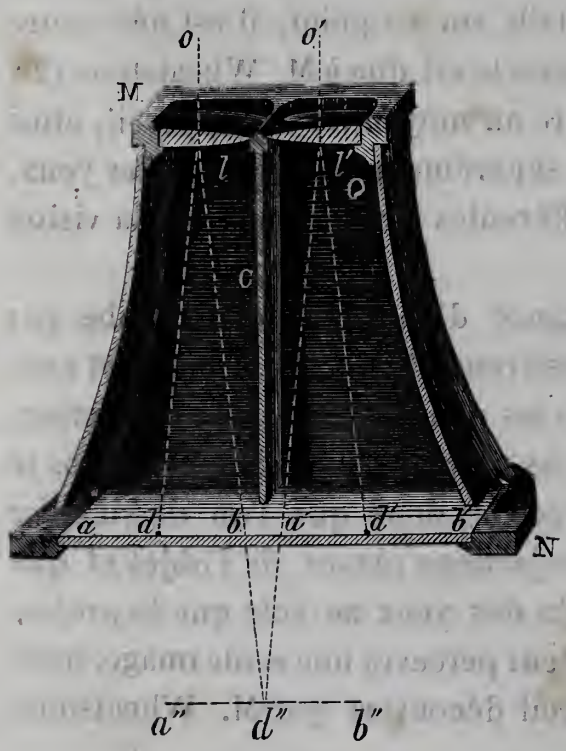


Fig. 76.

Brewster (1) a donné au stéréoscope une forme assez commode et généralement employée aujourd'hui : cet appareil, représenté fig. 76, consiste en deux prismes à surfaces convexes l, l', obtenus en coupant en deux parties une lentille convexe de 18 centimètres de distance focale, et disposés de façon à ce que leur partie la plus étroite se trouve en contact. Ces prismes lenticulaires sont fixés à la partie supérieure d'une caisse MN de 15

(1) Helmholtz, *Optique physiolog.*, page 811 et suivantes.

cent. de hauteur environ séparée en deux parties par une cloison C. Les deux images planes, placées en ab, a'b', sont vues la première par l'œil gauche en o, la seconde en o' par l'œil droit; l'effet des deux prismes est de faire voir les images ab, a'b', en a''b'', les rayons émanés des points d et d' symétriques de l'image, éprouvant une réfraction qui leur donne la direction obd'', o'a'd'', et la position de a''b'' étant celle du foyer conjugé de ab ou de a'b' par rapport aux lentilles, l, l'. On a aisément ainsi la sensation d'une seule image en relief au lieu de celle de deux images planes vues séparément. Les dessins sont introduits par des fentes ménagées sur le côté de l'appareil en a et b' et sont vus soit par diffusion, soit par transparence; dans ce dernier cas, on place en dessous de aba'b' une plaque de verre dépoli qui permet d'éclairer les images au travers des papiers ou des glaces sur lesquelles elles sont représentées.

Souvent les prismes lenticulaires l, l' sont placés dans des montures en cuivre fixées à la partie supérieure du stéréoscope et s'écartent ou se rapprochent l'une de l'autre selon l'écartement des yeux; elles peuvent également s'approcher plus ou moins des images suivant la distance de la vision distincte de l'observateur; on a même changé la distance focale des lentilles de manière à amplifier les images. Ces diverses dispositions peuvent être utiles selon les circonstances.

Comme les images stéréoscopiques sont répandues de tous côtés et surtout les photographies stéréoscopiques, il n'est pas nécessaire d'insister ici sur les effets surprenants qu'elles donnent; la vivacité avec laquelle elles représentent les reliefs est tellement frappante comme dans les paysages, les monuments, les glaciers, etc., que, lorsqu'on voit en réalité les objets, on n'acquiert, sous le rapport de la forme, aucune notion nouvelle plus exacte que celle que l'on possédait déjà.

On a beaucoup multiplié les dispositions des appareils basés sur la perception simultanée d'images différentes par les yeux de façon à faire naître diverses illusions : tels sont le *pseudoscope* qui renverse le relief stéréoscopique; le *télestéréoscope* qui exagère le relief des objets, lesquels à cause de leur grande distance ne donnent pas d'effet stéréoscopique; et d'autres encore.

On a appliqué les principes stéréoscopiques au microscope, ainsi qu'à l'ophthalmoscope, comme on l'a vu antérieurement, page 319; on a également représenté par projection des images planes qui au moyen de dispositions convenables peuvent donner la sensation de re-

lief. On peut consulter sur ce sujet les ouvrages où se trouvent décrits les procédés à l'aide desquels on obtient ces diverses illusions d'optique (1).

Parmi les expériences que l'on doit prendre en considération quand on cherche à se rendre compte des effets de la vision binoculaire, ainsi que de la perception des couleurs, on peut citer celles dont la première idée est due à Dutour (2); elles consistent à impressionner simultanément chaque rétine d'un observateur par des rayons lumineux de couleur différente. On peut, pour arriver à ce but, regarder une surface blanche en plaçant devant chaque œil un verre coloré de diverses teintes, ce qui s'exécute aisément à l'aide de lunettes besicles ayant des verres de différentes couleurs. Au lieu d'opérer ainsi on peut peindre sur deux cartons deux cercles égaux de teintes dissemblables et les observer dans le stéréoscope; les résultats sont les mêmes, c'est-à-dire que dans ces divers modes d'expérimentation les deux champs visuels sont simultanément éclairés par des rayons diversement colorés.

L'impression ressentie par les observateurs n'a pas toujours été la même, ce qui montre que ce fait présente des différences individuelles considérables : un certain nombre d'expérimentateurs, et c'est le plus grand nombre, voient dans ce cas le champ coloré avec la couleur résultant du mélange des deux, non-seulement pour des couleurs faibles, mais encore pour des couleurs vives, et dans le cas où les couleurs sont complémentaires, ils ont la sensation du blanc. D'autres voient une alternance des deux couleurs, qui a lieu d'abord au commencement de l'expérience, puis qui s'atténue quand on prolonge l'observation et qui reparaît après, alternance indiquant que la vision de chaque œil l'emporte successivement. Quelquefois la superposition des impressions différentes n'a pas lieu dans tout le champ de la vision; une des teintes qui prédomine semble parsemée de taches offrant la couleur des rayons lumineux qui affectent l'autre œil, ce qui montre que les différents points des rétines ne sont pas, à ce moment, également sensibles.

Ces expériences semblent être favorables à l'hypothèse d'après la-

(1) *Transact. philos. d'Édimbourg*, t. 15. — *Journal d'Édimbourg*, t. 48, p. 150. — *Journal l'Institut*, n° 850, p. 128 (1850). — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, t. 31, p. 895. — *Bullet. de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1851, p. 45. Giraud-Teulon, *vision binoculaire*.

(2) *Mém. des savants étrangers*, t. 3, p. 514. *Id.*, t. 4, p. 541.

quelle on considère les fibres nerveuses émanées de parties correspondantes des rétines des deux yeux comme aboutissant au même point de l'encéphale, c'est-à-dire que les filets nerveux seraient constitués par paires semblables aboutissant à des points correspondants des rétines. Il y a un fait physiologique qui semblerait encore venir à l'appui de cette opinion : c'est une espèce de fatigue ou de paralysie momentanée de la rétine, par moitié et de même côté pour chaque œil, de droite ou de gauche simultanément, en sorte que les personnes qui en sont atteintes momentanément ne voient que la moitié droite ou la moitié gauche des objets. Cette hypothèse a été combattue dans ces dernières années en se basant surtout sur les effets de la vision stéréoscopique, car l'impression d'un seul objet résulte, dans ce cas, de deux images objectives différentes.

Il semble, d'après ce qui précède, qu'il n'est pas plus difficile de comprendre la vision simple avec les deux yeux que d'avoir la notion de l'unité des objets par le toucher au moyen des deux mains. Quand on fixe les yeux sur un objet placé à quelques mètres de distance, si l'on vient, sans changer la direction des axes optiques, à interposer le doigt ou une tige de bois vis-à-vis des yeux à quelques centimètres de distance, on a deux images du doigt ou de la tige, quoique d'une manière indistincte ; ce n'est qu'en dirigeant les yeux sur le doigt ou sur la tige qu'on la voit simple et distinctement. Ainsi la direction des axes optiques fait que les deux images formées sur la rétine donnent une sensation simple.

Quant à la position exacte des objets, la vision simple avec un œil ne saurait la donner immédiatement sans que le toucher ou les rapports de position avec les objets extérieurs viennent faire juger du lieu où elle se trouve. L'expérience connue de Malebranche le montre aisément : si l'on place un anneau à quelque distance de soi et qu'en fermant un œil on cherche à passer le doigt dans l'anneau, on ne peut en général y parvenir immédiatement et l'on se trompe sur le lieu réel où il se trouve; en ouvrant les deux yeux l'erreur n'est pas possible. Cependant avec un seul œil on parvient aisément à juger la position des objets; mais il faut examiner d'autres objets voisins, comparer leurs grandeurs, leurs positions, et pour cela déplacer l'œil ; avec les deux yeux, ce jugement est produit instantanément, probablement en raison de l'habitude que l'éducation des yeux nous a donnée. Ce fait de l'instantanéité est prouvé en illuminant une pièce d'un appartement par la décharge d'une bouteille de Leyde ; la lumière ne dure qu'un instant

très-court et cependant ce temps suffit pour nous donner la notion de la position, de la grandeur et du relief des objets.

On n'a cité ici qu'un petit nombre des exemples que l'on pourrait donner au sujet des effets de la vision binoculaire, mais ils suffisent pour montrer que si dans l'état actuel de la science on ne peut donner une explication complétement satisfaisante des différentes circonstances qui peuvent se présenter, on peut dire d'une manière générale que la vision unique des objets avec les deux yeux vient de ce que les images objectives formées par un objet sur les deux rétines, sans être identiques, sont à peu près semblables, et de ce que la notion de la position de cet objet résulte de la convergence des axes optiques vers lui ; nous jugeons d'après cela qu'il est unique ; c'est une question de jugement que l'éducation des yeux et l'habitude nous a appris à porter. La vision simple avec les deux yeux dépend donc de la manière dont nous interprétons nos sensations (1).

(1) Voir, pour plus de détails, Longet, *Traité de physiologie,* tome 2. — Giraud-Teulon, *Physiologie et pathologie de la vision binoculaire.* Paris 1861. — Helmholtz, *Optique physiologique.*

FIN DU TOME SECOND.

# TABLE DES MATIÈRES.

## SECONDE PARTIE.

### EFFETS DE LA LUMIÈRE.

Pages.

## PRÉLIMINAIRES.

EFFETS DIVERS PRODUITS PAR LA LUMIÈRE. EXTINCTION DE LA LUMIÈRE; TRANSPARENCE, DIFFUSION ET COULEURS DES CORPS..... 1

## LIVRE PREMIER.

### EFFETS CALORIFIQUES.

CHAP. Ier. *Phénomènes généraux. Appareils employés.*
§ 1. Effets généraux. Miroirs ardents, lentilles..... 15
§ 2. Appareils thermo-électriques..... 21
CHAP. II. *Analyse par réfraction des rayons calorifiques.*
§ 1. Spectre calorifique..... 24
§ 2. Action des écrans sur le rayonnement calorifique. Substances diathermanes. Écrans incolores et colorés, solides, liquides et gazeux..... 28
§ 3. Incandescence produite par les rayons calorifiques obscurs..... 37
§ 4. Quantité de chaleur émanée du soleil. Action exercée par l'atmosphère terrestre..... 41

## LIVRE II.

### EFFETS CHIMIQUES.

CHAP. Ier. *Effets divers, phénomènes généraux.*
§ 1. Préliminaires : action de la lumière sur les vapeurs, le phosphore, le chlore; coloration des verres..... 45
§ 2. Combinaisons produites sous l'action de la lumière, en présence du chlore, du brome, de l'iode ou de l'oxygène; matières colorantes..... 51
Protoxyde de plomb..... 56

Pages.

Résine de gaïac..... 57

§ 3. Décompositions produites sous l'influence de la lumière. Effets produits sur les combinaisons d'argent, d'or, de platine, de mercure, de fer, etc., et sur les substances organiques..... 60

Combinaisons d'argent ; chlorure, bromure, iodure, azotate, etc..... 61

Id. d'or, de platine..... 66

Id. de molybdène, de plomb..... 67

Id. de cuivre, de mercure..... 68

Id. de fer..... 70

Id. d'uranium, de chrome..... 73

§ 4. Effets chimiques continués après l'influence lumineuse. Rayons continuateurs ..... 75

Action chimique de la chaleur rayonnante..... 77

Chap. II. *Effets produits par les rayons différemment réfrangibles.*

§ 1. Effets du spectre solaire sur les matières impressionnables..... 79

Phosphore, chlore et hydrogène..... 81

Combinaisons d'argent, chlorure, bromure, iodure, etc..... 82

Continuation d'action sous l'influence des rayons les moins réfrangibles.. 88

Action inverse des rayons extrêmes rouges..... 90

Combinaisons d'or..... 94

Id. de chrome, de plomb, de mercure..... 95

Id. de cuivre..... 96

Matières organiques..... 98

§ 2. Action des écrans incolores et colorés. Prismes divers.. ..... 102

§ 3. Sources lumineuses diverses : lumière électrique, flammes..... 116

Lampe au magnésium..... 117

Lumière électrique. Étincelles d'induction..... 119

Chap. III. *Effets électriques produits sous l'influence de l'action chimique de la lumière.*

§ 1. Effets observés avec les lames métalliques et les substances impressionnables..... 121

§ 2. Actinomètre électro-chimique..... 131

§ 3. Effets électriques dus à l'action des rayons différemment réfrangibles sur l'iodure d'argent et le sous-chlorure d'argent violet..... 137

§ 4. Comparaison entre l'intensité lumineuse active et l'intensité du courant électrique produit lors de l'altération du sous-chlorure d'argent..... 144

Chap. IV. *Comparaison entre les intensités des rayons des diverses sources lumineuses agissant sur les substances impressionnables. Extinction des rayons actifs.*

§ 1. Méthodes de comparaison..... 147

§ 2. Effets des différentes sources lumineuses : soleil, lumière diffuse, lampe à gaz oxygène et hydrogène, flamme du magnésium en combustion..... 158

§ 3. Extinction des rayons actifs..... 163

## LIVRE III.

### PHOTOGRAPHIE.

Pages.

CHAP. Ier. *Daguerréotype.*

§ 1. Découvertes de Nicéphore Niepce et de Daguerre. Méthodes d'opération. 167

§ 2. Action de la lumière lors de la formation de l'image daguerrienne. Action des rayons différemment réfrangibles..... 175

CHAP. II. *Photographie. Épreuves sur papier, sur collodion, albumine, gélatine, etc.*

§ 1. Épreuves négatives ou clichés..... 179

Épreuves sur papier..... 179

Id. sur albumine, gélatine, collodion, etc..... 183

Id. sur collodion sec..... 188

§ 2. Épreuves positives aux sels d'argent. Épreuves positives directes à la chambre noire..... 189

§ 3. Épreuves positives diverses. Épreuves au charbon ou avec des poudres inaltérables..... 193

§ 4. Photographie des astres. Action des lumières artificielles..... 199

CHAP. III. *Gravure photographique et litho-photographie.*

§ 1. Gravure photographique..... 201

Gravure par action des acides..... 201

Gravure par moulage. Hélioplastie..... 205

§ 2. Litho-photographie..... 207

CHAP. IV. *Reproduction des couleurs par l'action de la lumière.*

§ 1. Préparation de la couche sensible. Sous-chlorure d'argent..... 209

§ 2. Modification produite par la chaleur et par les rayons infra-rouges sur la couche sensible..... 218

§ 3. Effets produits par les rayons différemment réfrangibles; spectre solaire, écrans incolores et écrans colorés..... 220

§ 4. Reproduction des images colorées de la chambre noire ainsi que des estampes coloriées..... 228

§ 5. Altération à la lumière des images photographiques colorées produites par le sous-chlorure d'argent..... 231

## LIVRE IV.

### EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

CHAP. Ier. *Effets produits sur les végétaux.*

§ 1. Effets généraux. Germination..... 235

Pages.

§ 2. Inflexion des tiges et des racines sous l'influence de la lumière; nutation des plantes héliotropes..... 238
§ 3. Mouvements divers. Sommeil des fleurs et des feuilles. Enroulements.... 252
Sommeil des fleurs..... 252
Id. des feuilles..... 257
Enroulements. Plantes volubiles..... 260
§ 4. Aspiration; transpiration..... 263
§ 5. Respiration, fixation du carbone dans les végétaux..... 266
Action des rayons différemment colorés..... 268
Rôle de l'acide carbonique dans la respiration des végétaux..... 281
Id. de l'oxygène..... 283
Id. de l'azote..... 284
§ 6. Coloration des fleurs et des tissus végétaux..... 285
§ 7. Intensité de l'action chimique exercée par les rayons solaires sur les plantes. Resumé du premier chapitre..... 288
Chap. II. *Effets produits sur les animaux.*
§ 1. Action exercée sur les infusoires..... 293
§ 2. Action de la lumière sur certaines fonctions des animaux..... 295
§ 3. Coloration des tissus des animaux. Insolation..... 298

## LIVRE V.

### DE LA VISION.

Chap. Ier. *Constitution de l'œil.*
§ 1. Description de l'œil humain. Accommodation..... 302
§ 2. Absorption, diffusion et transformation des différents rayons par les milieux de l'œil..... 307
§ 3. Défaut d'achromatisme de l'œil..... 310
§ 4. Appareils destinés à l'étude optique de l'œil. Ophthalmoscopes. Effets entoptiques..... 314
§ 5. Lueur oculaire. Sensibilité de diverses parties de la rétine; punctum cœcum, macula lutea. Phosphènes..... 322
Chap. II. *De la sensation lumineuse.*
§ 1. Variation de l'intensité de la sensation avec celle de l'intensité lumineuse..... 326
§ 2. Composition des couleurs; couleurs complémentaires..... 329
§ 3. Hypothèses sur le mécanisme de la sensation des couleurs. Dyschromatopsie..... 336
Intensité relative des sensations produites par des lumières différemment colorées..... 338
Limites de sensibilité de la rétine..... 340
§ 4. Classification des couleurs. Gammes chromatiques..... 340

Pages.

CHAP. III. *Phénomènes accessoires, simultanés ou consécutifs à la sensation lumineuse.*

§ 1. Irradiation..... 346

§ 2. Persistance de la sensation lumineuse ; sa durée. Thaumatrope, Phénakisticope..... 348

§ 3. Images accidentelles..... 356

§ 4. Contraste. Contraste simultané ; contraste successif..... 360

§ 5. Vision binoculaire. Stéréoscope; Pseudoscope..... 367

FIN.

# ERRATA.

Une erreur typographique du 1er volume a été reproduite dans le second : dans différents passages, *au lieu* du nom écrit Herschell, *lisez :* Herschel.

Page 21, ligne 11, *au lieu de :* On A, *lisez :* On a.

Page 58, ligne 17, *au lieu de :* bleu de Prusse (cyanure de fer), *lisez :* bleu de Prusse { double cyanure, $(Fe\ Cy)^3$, $(Fe^2\ Cy^3)^2$, 9HO. }

Page 66, ligne 30, *au lieu de :* le chlorure, l'oxyde d'or... *lisez :* le chlorure et l'oxyde d'or.

Page 67, ligne 15, *au lieu de :* Phypson, *lisez :* Phipson.

Page 70, ligne 26, *au lieu de :* cyanoferrite, *lisez :* cyanoferride de potassium.

Page 72, ligne 13, *au lieu de :* cyanoferrite, *lisez :* cyanoferride de potassium.

Page 72, ligne 25, *au lieu de :* ferro cyanure rouge de potassium, c'est-à-dire le cyanoferrite, *lisez :* ferricyanure de potassium, c'est-à-dire le cyanoferride.

Page 150, ligne 12, *au lieu de :* oxalade, *lisez :* oxalate.

Page 150, ligne 25, *au lieu de :* insolatino, *lisez :* insolation.

Page 161, ligne 18, *au lieu de :* n'a plu, *lisez :* n'a plus.

## AVIS POUR LE PLACEMENT DES PLANCHES DU 2e VOLUME.

---

Mettre à la page 81 la planche fig. 13, représentant les raies du spectre solaire.

Mettre à la page 342 la planche colorée, gamme chromatique des couleurs franches.

8247

91-B19657

Special 91-B
19657

THE GETTY CENTER
LIBRARY